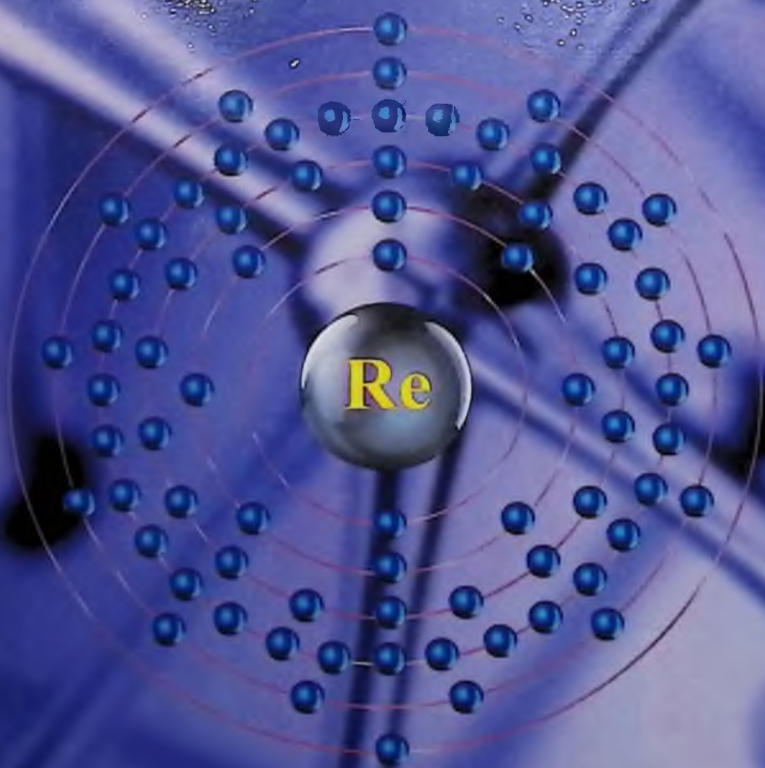


Петухов О.Ф., Санакулов К,
Курбанов М.А., Шарафутдинов У.З.

РЕНИЙ



Петух

673

+ 54

P-392

Э. О.Ф., Самакулов К., Курбанов М.А., Шарафутдинов У.З.

РЕННИЙ

120231

• TDIU
kutubxonasi

12/3

120231

Навои - 2020

673

+54

УДК 669.849

ББК 34.2

Р 392

В монографии обобщены сведения о свойствах, применении рения, описаны современные методы извлечения рения из рудного и вторичного сырья, получения рениевой кислоты, металлического рения и изделий из него, методах производства и аналитической химии рения. Особое внимание уделено экстракционно-сорбционным процессам, занимающим доминирующее положение в металлургии рения. Приведены конкретные примеры действующих технологических схем извлечения рения из различных видов сырья и их аппаратурного оформления.

Книга предназначена для специалистов горно-металлургической отрасли, бакалаврам, магистрам, преподавателям и научным сотрудникам вузов горного профиля.

Рецензенты:

Доктор химических наук, профессор	Мухиддинов Б.Ф.
Доктор технических наук, профессор	Хасанов А.С.
Доктор химических наук, профессор	Шарипов Х.Т.

ISBN-978-9943-6650-1-9

© Типография НГМК, 2020 г.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Химия и технология рения – одного из наиболее редких металлов, - неразрывно связана с развитием металлургической науки и техники в Республике Узбекистан. Именно в Узбекистане были впервые разработаны и освоены в промышленности технологии попутного извлечения рения из урановых растворов подземного выщелачивания (НГМК), из отходящих газов и растворов сернокислотного производства медеплавильного завода (АГМК), а также попутного извлечения рения при азотнокислой переработке сульфидного молибденового концентрата (АГМК, УзКТЖМ).

Необходимость в расширении производства рения диктуется его некоторыми специфическими, а порой и уникальными свойствами. В частности, рений становится незаменимым металлом в ракетостроении, производстве катализаторов и инструментов в машиностроении и т.д.

В отличие от многих других металлов промышленное производство рения началось лишь после второй мировой войны. Это объясняется не столько отсутствием спроса на этот металл, сколько в сложности его получения. Трудность получения рения состоит в чрезвычайно большой его рассеянности в природе и отсутствии собственных минералов и месторождений. Следовательно, неотложная задача геологов, исследователей и практиков металлургов и химиков – это расширение сырьевой базы для промышленного производства рения и разработка экономичных технологических схем извлечения рения из различного попутного сырья.

По мнению авторов, весьма перспективным сырьём для получения рения на территории Узбекистана, на ряду с медно-молибденовым (АГМК) и урановым (НГМК) производствами могут быть уран-ванадий содержащие черные и горючие сланцы, запасы которых исчисляются десятками миллиардов тонн руды. Первые исследования в

этой области, проведённые авторами книги, показывают на безусловную перспективность данного направления.

Возникшие в последние годы проблемы – от освоения новых (как правило, очень бедных) источников рения до разработки новых материалов на основе рения, не нашли отражения в уже изданных книгах. (См., например, книгу «Металлургия рения» - М.: Наука -2007г., авторов Палант А.А., Трошкина И.Д., Чекмарёв А.М.). Поэтому авторы постарались восполнить указанный пробел. Многие материалы публикуются в книге впервые.

Авторы выражают глубокую благодарность рецензентам книги: Мухиддинову Б.Ф., Хасанову А.С., Шарипову Х.Т., которые дали ряд ценных замечаний и рекомендаций.

ГЛАВА I.

РЕНИЙ: ВЧЕРА, СЕГОДНЯ, ЗАВТРА

1.1. Исторический очерк

Рений относится к элементам, нахождение в природе которых были предсказаны заранее. И сделал это в 1871-1872 годах Д.И. Менделеев на основе открытого им закона и Периодической системы элементов. Он предсказал существование двух аналогов марганца – экамарганца (атомный вес 100) и двимарганца (атомный вес 190). В отличие от экабора, экаалюминия и экасилиция Менделеев для этих элементов не привёл подробной характеристики свойств. Двимарганец – будущий элемент № 75 – был назван рением.

И честь открытия рения принадлежит немецким химикам Вальтеру Ноддаку и Иде Такке.

Свои поиски они начали в 1922 году. Первоначально В. Ноддак и И. Такке обобщили все публикации, посвящённые открытию якобы аналогов марганца. Далее учёные составили обширный план поиска. Они искали сразу два элемента, аналоги марганца. Это были химические элементы под номерами 75 и 43, последний также был неизвестен на тот момент. Исходя из общих закономерностей периодической системы, свойства этих элементов были подробно спрогнозированы.

После упорных и кропотливых исследований Ида Такке на заседании академии наук в Берлине 11 июня 1925 года сообщила об открытии нового элемента – рения. Совместно со своим будущим супругом Вальтером Ноддаком и специалистом по спектроскопии О. Бергом она, воспользовавшись методами химического обогащения, выделила вещества из различных минералов. О. Берг снимал рентгеновские спектры этих веществ. И вот при переработке норвежского минерала колумбита исследователи наткнулись на следы неизвестных металлов. Эти металлы они назвали мазурий (элемент № 43) и рений (элемент № 75). Концентрация металлов составляла всего $10^{-6} - 10^{-7}$ г.



Вальтер Ноддак



Ида Ноддак-Такке

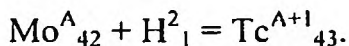
В июне 1925 года была опубликована статья об открытии химических элементов № 43 и № 75, авторами которой были В. Ноддак, И. Ноддак-Такке и О. Берг. Элемент рений был назван по имени Рейнской области в Германии. Эти элементы были найдены в двух минералах: колумбите и уральской платиновой руде. Но пока эти элементы ещё не были выделены в свободном виде. И это послужило причиной началу борьбы за приоритет этого открытия. Так, немецкий химик — аналитик Вильгельм Прандтль сделал доклад на заседании химического общества в Мюнхене. Он предлагал не принимать заявку на открытие элемента рения, сделанную В. Ноддак и И. Ноддак-Такке, поскольку, дескать, ему не удалось найти эти элементы ни в указанных минералах, ни в переданной пробе вещества, которая по данным И. Ноддак-Такке должна была содержать от 0,8 до 1,0% рения. В. Прандтль отправил в командировку к ним в лабораторию своего ученика А. Грима с целью ознакомления с методами получения аналогов марганца. Гримм досконально записал методику обнаружения элементов № 75 и № 43, но, вернувшись домой, решил её усовершенствовать, и не получил ожидаемого результата. Масло в огонь подлили и другие учёные: англичанин Ф. Лоринг, чехи И. Друце, Я. Гейровский и Долейчек. Позже эти исследователи сами подадут заявку на открытие элемента под номером 75, но при помощи других методов и в других объектах. Чешские учёные заявили, что им удалось обнаружить 1% элемента № 75 в солях марганца полярографическим и спектроскопическими методами, при этом раньше, чем В. Ноддак и И.

Ноддак Такке. Англичанин Ф. Лоринг опубликовал сообщение о синтезе элементов № 43 и № 75 в рентгеновской трубке. Другой английский учёный Брюс также сделал заявку на открытие нового элемента под № 75. В спор вмешался советский исследователь О.Е. Звягинцев, который уверял, что в платиновых рудах элемента № 75 вовсе нет. Много сил потратила Ида Ноддак, защищая свой приоритет. В частности, она доказала, что Брюс имел дело не со следами элемента № 75, а лишь с марганцем, загрязнённым железом. Что касается Гейровского и Долейчека, то проверка их опытов не дала никаких признаков на новый элемент. Спектральные линии, наблюдавшиеся чехами, могли принадлежать ртути и таллию, а не элементу № 75. Супруги Ноддак считали удивительным, что господин Прандтль не обнаружил рения. В переданном ему веществе содержались также уран и ниобий - в количествах десятикратных по сравнению с элементом № 75. Но даже эти элементы Прандтль не смог обнаружить. "Мы готовы, - объявила Ноддак, - послать Прандтлю новый препарат, если он может удостоверить, что его спектрограф способен уловить содержание в несколько процентов". Это замечание вызвало у старого химика обиду: более 25 лет работал он с редкими и рассеянными элементами. "Я могу без преувеличения сказать, что в области препаративной неорганической химии располагаю несравненно большим опытом. На основании этого опыта я должен с сожалением отметить, что методы, с помощью которых В. и И. Ноддак хотят выделить оба экамарганца из минералов, нехороши." Спор длился несколько лет. А между тем немецкие учёные упорно работали над сбором доказательств. Летом 1926 и 1927 годов супруги отправлялись в экспедиции в Норвегию для отбора новых минералов. Они собирали танталиты, гадолиниты, альвиты, фергусониты, молибденовые блески. В 1928 году они начинают анализ найденных минералов и, наконец, выделили приблизительно 120 мг рения. В октябре 1929 года Ноддак сообщили о выделении ими в целом 1 г рения. Они получили это количество из 600 кг минерала молибденового блеска и доказали чистоту нового элемента спектральными методами. Тем самым клетка с порядковым номером 75 в периодической системе оказалась занятой.



Металлический рений

Что касается судьбы элемента 43, то открытие его было ошибочным. Этот элемент был получен только в 1937 году Сегре и Перье путём бомбардировки молибдена дейтерием:



Элемент № 43 был назван технецием. Итак, история науки закрепила открытие рения за немецкими учёными В. Ноддак, И. Ноддак-Такке. Но было бы не справедливым хотя бы кратко не упомянуть и о других исследователях, внёсших свой вклад в открытие и изучение этого элемента. В 1877 г. русский химик С. Керн сообщил об открытии в платиновых остатках нового элемента. Раствор, получавшийся после удаления платины, иридия и родия, был сконцентрирован с хлоридом и нитратом аммония, при этом выпадал тёмно-красный осадок. После прокаливания осадка получалась серая пористая масса, которая при сплавлении в кислородном пламени образовывала серебристый слиток нового металла. Керн назвал его «дэвием» в честь великого английского химика Г. Дэви. Это очень заинтересовало Д.И. Менделеева, и он решил пригласить на заседание химического общества С.Ф. Керна с предложением выступить с докладом. В лаборатории Р. Бунзена в городке Гейдельберге было решено скрупулёзно проверить все результаты С.Ф. Керна. И в дальнейшем двум-трём учёным всё-таки удалось подтвердить открытие Керна. Многие химические реакции, характеризующие дэвий были точно такими, как реакции впоследствии открытые для рения. Следовательно, встаёт вопрос, дэвий и рений — а не были ли эти элементы одним и тем же элементом?

Керн получил дэвий из платиновых руд в 1878 году и больше никогда не занимался исследованием этого элемента, так как он выделил его из платиновых руд, а в то время это считалось невозможным. Значительно позже было выяснено, что платиновые руды имеют очень сложный и изменчивый состав. В уральской руде, на самом деле, нет рения, но в рудах других месторождений он присутствует.

Керну же для исследования попался очень редкий образец платиновой руды из практически выработанных месторождений на острове Борнео. В начале 20 века на этом острове работал русский химик Г.П. Черник. Он занимался анализом состава руд и всякий раз отмечал потерю в массе, и объяснял это присутствием в руде неизвестного элемента. Возможно, это и был дэвий. В 1950 году И. Друце опубликовал большую статью о дэвие. Он написал о том, что если рений был найден в платиновых минералах, то это подтверждает открытие С.Ф. Керна. Сейчас осталось несколько образцов платиновых руд, найденных на острове Борнео, но они хранятся в минералогических музеях.

Первое промышленное производство рения из отходов переработки медно-молибденовых руд было организовано в начале 30-х годов XX века по методу, разработанному Файтом.

1.2. Области применения рения

В последнее время рений начинает находить всё большее применение в промышленности, и области его применения постоянно расширяются.

Сплавы рения. Для производства сплавов используется до 40% производимого рения. Одним из первых направлений в использовании рения было создание жаропрочных сплавов. Помимо рения в состав этих сплавов входят никель, хром, молибден и титан. Имеются жаропрочные сплавы рения, обладающие очень высокой твёрдостью и пластичностью до 1150°C. В 90-х годах XX века окончательно оформилась новая, весьма металлоёмкая область применения жаропрочных сплавов рения – суперсплавы для авиационной и космической техники. Дело в том, что хотя рений и уступает несколько по температуре плавления вольфраму, у него более высокая температура

рекристаллизации (1500 против 1100°С у вольфрама). Он превосходит вольфрам и прочие тугоплавкие металлы механическими свойствами при высокой температуре. Современная металлургия считает, что наиболее высокие механические свойства при температуре порядка 2000 - 3000°С могут быть получены только у сплавов рения. Особенно широкое применение нашли сплавы рения с вольфрамом и молибденом. Основными областями применения этих сплавов являются космическая, авиационная и ракетная техника (детали термоионных двигателей, насадки ракет, части ракетных сопел). Рений стал широко применяться в производстве высокотемпературных суперсплавов на основе никеля. Эти сплавы используются для изготовления турбин самолётов. Торсионы, изготовленные из сплава МР - 47ВР, превосходят по своим свойствам все имеющиеся материалы.

Сплавы рения с вольфрамом используются в атомной энергетике для изготовления оболочек тепловыделяющих элементов, способных работать при температурах 1650 - 3000°С.

Из сплава Та - W - Re изготавливают теплозащитные экраны аппаратов, возвращающихся из космоса на Землю.

Сплав ReSi_2 - металлоид с очень интересными свойствами, применяется в качестве защитного покрытия в полупроводниковой технике. Особое значение приобрели сплавы Re/Ir - 20Re и Re/Ir - графит: они используются для защиты покрытий космических аппаратов.

Добавки рения к платине делают её износостойкой, не снижая антикоррозионных свойств. Сплав рения с платиной нашёл применение для изготовления фильер в производстве искусственного шёлка, а также для изготовления наконечников перьев автоматических ручек. Для этой цели используют коррозионностойкие сплавы, содержащие 10-60% рения.

Добавки рения заметно улучшают механические свойства иридиородиевых сплавов, делая возможным изготовления из них очень тонкой фольги и проволоки.

Ренийевые покрытия. Рений и сплавы с его участием обладают великолепной химической устойчивостью к кислотам и щелочам. Это используется для изготовления ренийевых покрытий, применяющихся для защиты оборудования от действия агрессивных химических средств. При этом технология осаждения рения на меди, латуни, никеле и других металлах из водных сред достаточно проста.

Ренийевые покрытия используются для защиты серебра; рением покрывают вольфрамовые нити накала в электронных трубках. Ренийевые покрытия на вольфрамовых нитях и особенно ренийевые нити более устойчивы в присутствии паров воды, чем вольфрамовые. Так, при нагревании вольфрамовой и ренийевой проволоки диаметром 0,25 мм в атмосфере смеси азота и водорода в присутствии паров воды рений в 2-3 раза устойчивей вольфрама при температурах до 2000 – 3000°С.

Детали электроаппаратуры. Важное промышленное применение рений находят в контактах динамомашин, устанавливаемых на морских судах, вследствие его устойчивости против воздействия воздуха, насыщенного морской водой. Хорошо зарекомендовали себя электроконтакты на основе сплава с рением, работающие в аппаратах вибрационного типа и электронных трубках.

Сплавы рения с платиной используются в ответственных электроконтактах, прерывателях тока, компасах и других приборах.

Использование рения в нагревательных спиралях из вольфраморенийевых и молибденоренийевых сплавов продлевает срок службы в 5-10 раз в сравнении с известными вольфрамомолибденовыми спиралями.

Термоэлементы. Термопары, изготовленные с использованием рения, работают до 2000°С и имеют в 3-4 раза большую термоэлектродвижущую силу, чем обычные платино-родиевые термопары. Термопарой из сплавов рений – вольфрам можно измерять температуру почти до 3000°С.

Приборостроение. Малая скорость испарения, высокое удельное электросопротивление, высокая термоэлектронная эмиссия делают рений ценным

материалом для электронной промышленности. Рений и покрытые рением детали в несколько раз устойчивее обычных. Очень ценят детали из рения в приборостроении. Здесь он широко используется для изготовления деталей точных приборов; опор точных весов, пружин и осей геодезической аппаратуры.

Катализаторы. Мощным импульсом в добыче и производстве рения явилась новая область его применения — изготовление катализаторов. Основными свойствами катализаторов должна быть стойкость к рекристаллизации в процессе катализа. Рений с этой точки зрения представляет большой интерес, так как обладает ещё и высокой температурой плавления и значительной плотностью. Перренат аммония хорошо растворяется в воде, что делает его пригодным для приготовления катализаторов методом пропитки (наиболее простым и дешёвым).

В 1968 г. в США был изобретён биметаллический Pt — Re катализатор на носителе, используемый в реакциях превращения углеводородов. Тогда же был пущен первый завод риформинга бензиновых фракций на таком катализаторе. Этот процесс получил название «рениформинг». Использование рениевых катализаторов при получении бензина позволило увеличить производительность установок без их реконструкции и повысить октановое число бензина. Наибольший эффект дало использование рения в качестве промотора уже известных промышленных катализаторов — платиновых и палладиевых. Доля рения, используемого в производстве катализаторов и промоторов, составляет в мире 65% (в США — 75%). В США доля продуктов, получаемых процессом рениформинга составила 80% от всех продуктов, получаемых процессом риформинга в стране. В СНГ платиноворениевые катализаторы используются в виде марок КР (КР-108, КР — 110). Последние работают в несколько раз стабильнее монометаллических алюмоплатиновых катализаторов АП — 56 и АП — 64 (содержание же платины в них в 1,7 раза меньше). Таким образом, рений является уникальной и необходимой добавкой для создания эффективных композиций катализаторов для переработки нефтяных фракций методом риформинга.

Рений в виде порошка может использоваться в качестве катализатора при окислении аммиака и метана. При гидрировании этилена в этан и при восстановлении смеси углерода и водорода до метана может быть использован сплав рения с медью. При дегидрировании спиртов для получения альдегидов и кетонов хорошо в качестве катализатора зарекомендовал себя сульфид рения. При дегидрировании в процессе получения хлороформа можно использовать металлический рений. Окислы рения можно использовать при окислении SO_2 до SO_3 .

Очень эффективно применение рения и его сульфидов при каталитическом дегидрировании спиртов для получения альдегидов и кетонов, в частности, формальдегида и ацетона.

Можно с уверенностью сделать вывод о перспективности использования рения и его соединений в качестве катализаторов.

Автомобилестроение. Тугоплавкие специальные сплавы на основе рения широко используются для изготовления ответственных деталей в дорогих автомашинах. На основе рения изготавливаются фильтры – нейтрализаторы выхлопных газов автомобилей. Использование этих устройств позволит не только улучшить атмосферу городов и сёл, но и будет способствовать росту спроса на неэтилированный бензин.

Аналитическая химия. Соединения рения нашли применение в качестве реагентов в аналитической химии. Перрениевая кислота и перренаты применяются при обнаружении и осаждении калия, для разделения алкалоидов, а также для фракционной кристаллизации элементов редких земель.

Тигли, изготовленные из рения, используют для плавки под вакуумом цинка, олова, меди и серебра.

1.3. Объём производства рения и конъюнктура цен на рений и его продукты

Рений является очень редким рассеянным элементом (содержание рения в земной коре составляет $1 \cdot 10^{-7}\%$). Это обстоятельство обуславливает относительно небольшой объём его производства. Первое промышленное производ-

ство рения было организовано в Масфельде (Германия) в 1930 году, тогда было произведено 120 кг рения в виде перрената калия. В 40-х годах XX века этот завод выдавал уже 200 кг металлического рения в год, а мировое производство металла составило 400 кг.

В 1955 году мировое производство рения достигло 1 т в год, а в 1960-х годах – 4,5 – 5 т, в конце 80-х годов – 12-13 т, в начале XXI века – достигло 35-38 т, т.е. происходило утроение производства рения за каждые 10 лет. Трудно назвать ещё какой-нибудь металл, производство и потребление которого возрастало такими темпами. Только в США с 1990 по 2000 годы потребление рения возросло в три раза и составляет почти 30 т в год.

Анализ динамики производства рения (табл.1.1) показывает, что в таких странах, как Чили (основной производитель рения) он постоянно растёт; в Казахстане, Перу и России – стабилен, а в США – скачкообразно меняется. В 2009 г. производство рения составило 41,2 т, что на 10% меньше, чем в 2008 г. (45,6 т).

Таблица 1.1

Динамика производства рения

Страны	Производство рения (т) по годам					
	2000	2012	2013	2014	2015	2016
Чили	2,2	27,0	25,0	25,0	26,0	26,0
Казахстан	2,4	3,0	2,5	0,3	1,0	1,0
США	12,6	7,9	7,1	8,5	7,9	7,6
Перу	4,8	-	-	-	-	-
Россия	1,1	1,5	1,5	-	-	-
Канада	1,6	-	-	-	-	-
Армения	0,7	0,6	0,3	0,35	0,35	0,35
Прочие страны	3,0	1,2	1,0	2,0	1,8	1,8

В табл.1.2 приведены основные мировые производители рения. В настоящее время объёмы производства рения сопоставимы с объёмами производства платины, палладия и индия.

Таблица 1.2

Основные мировые производители рения

Страна	Фирма	Объём производства, т/год	
		Рения	Перрената аммония
По данным на 1995 год			
Чили	Molymet	-	6,8 – 11,0
США	Cyprus Climax	-	2,7
Германия	Starck	-	2,3
Япония	Sumitomo	-	0,9
СНГ	-	-	4,6
По данным на 2004 год			
Чили	Molymet	20-21	-
США	Phelps Dodge	4,0	-
Казахстан	Джезказганредмет	8,5	-
Россия	Уралэлектромедь	1,0	-
Польша	KGHM Metale SA	0,5	-
Китай	-	1,0	-
Европа		4,0 (возвратный Re)	-

Наиболее высокие темпы роста мирового потребления рения были зарегистрированы в 1971 – 1978 годах: тогда оно увеличилось в два раза – с 4,3 до 7,9 т. В 1985-1989 годах производство рения возросло в 1,5 раза – с 11 до 16,9 т. В первом случае рост производства рения был обусловлен спросом на металл со стороны производителей катализаторов риформинга нефти, во втором – использованием рения в суперсплавах для авиационных двигателей.

Наиболее крупным потребителем рения за рубежом являются США. Свыше 50% его мирового потребления в 1980-х годах приходилось на эту страну, причём примерно 90% было использовано в производстве платинорениевых катализаторов. В Европе из 5 т использованного рения на долю катализаторов приходилось менее половины.

Цена рения из-за малого объёма его производства и высокого спроса сравнительно велика. На заре своего

производства он стоил примерно столько же, сколько золото (выше 1000 долларов за кг). В 1953-1955 годах технический рений в США и Англии стоил 2000 долл/кг, в то время как золото – 1124 долл. за кг. В начале 70-х годов XX века его цена достигла уровня цен на платину (3000 – 3900 долл. за кг) и составляла 3256 долл. за кг. В середине 70-х годов XX века порошкообразный рений стоил 2100 – 2300 долл. за кг, к концу 70-х годов цена на рений упала до 1200 долл. за кг. В 1989 г. цены на рений в порошке составляли 1411 – 1543 долл. за кг, на перренат аммония – 1323 – 1499 долл. за кг. В начале 90-х годов XX века стоимость рениевых продуктов составляла: рениевого порошка 1320 – 1540, перрената аммония 1100 – 1280, рениевой кислоты 1400 долл. за кг. В 2005 – 2006 годах XXI века цена на рений была на уровне 3200 долл. за кг. В табл.1.3 приведены цены на рений содержащие продукты в период с 1990 по 2019 годы.

Таблица 1.3

Цены на рений содержащие продукты в период с 1990 по 2019 годы

Вид продукции	Годы								
	1990	2009	2010	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Re (гранулы)	1430	7500	4720	3000	2700	2000	1020	1040	900
NH4ReO4	1485	7580	4630	3100	2800	2600	970	980	830

Как видно из табл.1.3, цены на рениевую продукцию достаточно велики. Себестоимость производства рения относительно невелика, так как он извлекается при комплексной переработке молибденовых, медных и урановых руд. Например, в США себестоимость производства рения при его содержании в молибденитовом концентрате 200 г/т и выпуске 1,5 т рения в год не превышала 200 долл/кг. По данным Infogeo.ru цена на рений на мировом рынке с декабря 2016 г. по июль 2017 г. упала с 1100 до 890 долл/кг.

В табл.1.4 приведены данные по динамике мирового рынка рения.

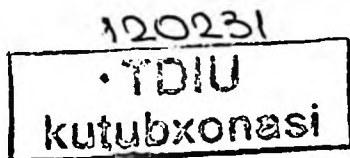
Таблица 1.4

Динамика мирового рынка рения, т

Показатель	Годы								
	2008	2009	2010	2011	2012	2016	2017	2018	2019
Производство	55.8	48.0	53.0	54.0	59.0	59.8	60.1	60.2	60.5
Погребление	62.0	53.5	53.2	56.2	64.2	62.0	59.6	64.5	66.2

В 2007-2009 годах объём потребления сплавов с рением превысил предложение. Накопленные ранее складские запасы были быстро исчерпаны. В период 2010 – 2014 годов (исключая 2012 г.) разбалансированность рынка уменьшилась.

С учётом изложенного, можно достаточно уверенно прогнозировать, что дальнейшее развитие металлургии рения и увеличение объёмов его производства обеспечит более высокий спектр применения этого металла в промышленности.



ГЛАВА II.

Основные свойства рения и его соединений

2.1. Рений в Периодической системе элементов и изотопы рения

Рений (порядковый номер 75) принадлежит к VII группе Периодической системы Д.И. Менделеева. Из элементов VII группы только рений – редкий элемент. Электронные конфигурации рения и его ближайших соседей приведены в табл.2.1.

Таблица 2.1

**Электронные конфигурации рения и его
ближайших соседей**

Ряд	Период	Подгруппы		
		VІb	VІІb	VІІІb
4	Первый длинный ¹		²⁵ Mn 3d ⁵ 4s ²	
6	Второй длинный ²	⁴² Mo 4d ⁵ 5s	⁴³ Tc 4d ⁵ 5s ²	⁴⁴ Ru 4d ⁷ 5s
8	Второй длинный ³	⁷⁴ W 4f ⁴ 5d ⁴ 6s ²	⁷⁵ Re 4f ⁴ 5d ⁵ 6s ²	⁷⁶ Os 4f ⁴ 5d ⁵ 6s ²

Примечание:

¹ Сверх структуры аргона 1s²2s²2p⁶3s²3p⁶.

² Сверх структуры криптона 1s²2s²2p⁶3s²3p⁶3d¹⁰4s²4p⁶.

³ Сверх структуры ксенона 1s²2s²2p⁶3s²3p⁶3d¹⁰4s²4p⁶4d¹⁰5s²5p⁶.

Сопоставление свойств рения с его аналогами обеспечивает более полное получение информации о свойствах рения и его соединений.

Как и все переходные элементы, рений характеризуется достраивающимся предпоследним электронным уровнем 5d. Это определяет участие в химических связях не только s -, но и d – электронов. Вследствие этого рений имеет несколько степеней окисления, проявляет повышенную склонность к комплексообразованию и другие характерные для переходных металлов свойства.

Рений, так же как технеций и марганец, имеет семь валентных электронов (2s и 5d). Максимальная положительная валентность рения равна семи. Рений,

марганец и технеций образуют ионы ReO_4^- , MnO_4^- , TcO_4^- . Для этих элементов с увеличением атомного веса элемента усиливаются такие свойства, как кислотность окислов, способность солей подвергаться гидролизу, устойчивость соединений с более высокой степенью окисления элемента. Например, семиокись марганца Mn_2O_7 заметно разлагается уже при температуре 0°C , семиокись технеция Tc_2O_7 плавится без разложения при $119,5^\circ\text{C}$, а семиокись рения Re_2O_7 плавится при 220°C и возгорается, не теряя кислорода.

Для марганца наиболее устойчивым является двухвалентное состояние Mn^{+2} . Для рения и технеция не известно ни одного простого двухзарядного катиона. Как правило, для рения и технеция наиболее устойчивы высшие состояния окисления. Для технеция наиболее характерны состояния окисления $+4$ и $+7$; для рения наиболее распространёнными состояниями окисления являются $+4$, $+5$ и $+7$. В водных растворах рений и технеций очень редко встречаются в виде катионов, чаще всего они представлены оксо-анионами, такими, как ReO_4^- , ReOCl_5^{2-} , TcO_4^- .

Подобие свойств элементов, расположенных по горизонтали в периодической системе, также обусловлено строением электронных оболочек. Различие рения, вольфрама и осмия сводится к степени заполнения $5d$ – подуровня. Так, в ионизированном состоянии марганец имеет 8-электронную конфигурацию, что отличает его от молибдена и рения, электронная структура которых является промежуточной между 8 – и 18 – электронной.

Атомные и ионные радиусы рения близки к радиусам молибдена, вольфрама, осмия, иридия и других платиновых металлов. Атомные радиусы (в Å) имеют следующие значения: рений 1,37; молибден 1,36; вольфрам 1,37; осмий 1,34; иридий 1,35; марганец 1,29; технеций 1,30.

Потенциалы ионизации рения и некоторых сходных с ним элементов приведены в табл.2.2.

Таблица 2.2

**Потенциалы ионизации рения и некоторых
сходных с ним элементов**

Эле- мент	Ионизационные потенциалы отрыва электронов, эВ							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Mn	7.41	14.50	33.97	53.40	75.80	127.4	127.4	206.3
Mo	7.20	15.70	27.00	40.53	55.50	71.7	132.7	153.2
Ru	7.50	16.37	28.62	40.52	662.90	80.6	99.6	119.3
Tc	7.28	15.26	31.90	43.00	59.00	76.0	94.0	162.0
Re	7.87	13.10	26.00	37.70	51.00	64.0	79.0	-

Рений образует соединения с валентностью от +7 до -1. Наиболее устойчивы соединения рения со степенью окисления +7 и +4. Степень окисления +7 является самой характерной для рения. Эта степень окисления проявляется в наиболее важных соединениях рения – семиокись рения Re_2O_7 , рениевая кислота HReO_4 и соли рениевой кислоты – перренаты. Перренат-ион ReO_4^- весьма устойчивое соединение как в кислых, так и в щелочных растворах.

Шестивалентный рений устойчив в окиси ReO_3 . Установлены галогениды и оксигалогениды шестивалентного рения, например, ReF_7 , ReOCl_4 .

Соединения пятиявалентного рения образуются при действии слабых восстановителей в растворах кислот и устойчивы в присутствии комплексообразователей, которые стабилизируют это валентное состояние рения.

Четырехвалентный рений образуется в водных растворах в присутствии различных комплексообразователей и избытка восстановителей. Соединения рения (IV) более устойчивы в кислых и слабощелочных растворах. Из четырехвалентных соединений известны ReO_2 , ReS_2 , ReCl_2 , ReF_2 и различные комплексные соединения.

Соединения трёх-, двух- и одновалентного рения образуются при действии сильных восстановителей в средах неводных растворителей и в атмосфере инертных газов. На воздухе и в водных растворах рений в указанных валентных состояниях неустойчив – он подвержен гидролизу и окислению.

Наиболее устойчивыми соединениями в трёх-, двух- и одновалентном состоянии являются π – комплексы с карбонилем, замещёнными фосфинами, диарсинами и др., поскольку эти лиганды способны стабилизировать низшие валентные состояния.

Степени окисления рения 0 и +1 зафиксированы в цианидных комплексах, 0 и -1 установлены в соединениях с карбонилем. Показано, что при полярографическом восстановлении рения (VII) в растворах KCl восстановление идёт до соединения с формальной валентностью рения -1.

В природе рений находится в виде смеси двух изотопов ^{185}Re и ^{187}Re . Содержание ^{185}Re в естественной смеси составляет 38,2%, а ^{187}Re 61,8%. Изотоп ^{185}Re является стабильным. Изотоп ^{187}Re является радиоактивным – период его полураспада составляет $(4 \pm 1) \cdot 10^{12}$ лет. В результате β – распада ^{187}Re переходит в ^{187}Os . На основе этой реакции разработан рений-осмиевый метод определения абсолютного возраста горных пород, минералов и метеоритов.

Искусственно полученных изотопов рения насчитывается более двадцати. Изотопы ^{186}Re и ^{188}Re с периодами полураспада 3,87 дня и 16,7 часа соответственно используются для проведения исследований с мечеными атомами.

2.2. Металлический рений

Компактный рений представляет собой серебристо-белый металл, по внешнему виду похожий на сталь или платину. Некоторые свойства металлического рения (в сравнении с другими тугоплавкими металлами – молибденом и вольфрамом) приведены в табл.2.3.

Таблица 2.3

Физические свойства рения, молибдена и вольфрама

Свойства	Металлы		
	Рений	Молибден	Вольфрам
1	2	3	4
Атомный номер	75	42	74
Атомный вес	186,31	95,95	183,92

Продолжение табл. 2.3

1	2	3	4
Атомный объём, см ³ /г-атом	8,9	9,41	9,63
Радиус атома, А°	1,373	1,390	-
Удельный вес, г/см ³ (при 20°С)	21,02	10,2	19,3
Температура плавления, °С	3180 ±20	2625±50	3415±20
Температура кипения, °С	5870 - 5900	4800	5000
Коэффициент линейного расширения (20 – 1917°С), ·10 ⁻⁶	12,45 (параллельно оси С) 4,67 (перпендикулярно оси С)	4,9	4,3
Средний коэффициент термического расширения (20 10000°С), ·10 ⁻⁶	6,8	5,3	4,1
Удельная теплоёмкость (200°С), кал/г·°С	0,0322	0,060	0,032
Удельное электросопротивление (200°С), Ом·см, 10 ⁻⁶	19,14	5,17	5,5
Температурный коэффициент электросопротивления (0-1000°С) ·10 ³	3,11	4,33	4,82
Удельная магнитная восприимчивость при 200°С, ·10 ⁻⁶	+0,35	+0,04	+0,28
Кристаллическая решётка	Гексагональная плотная упаковка	Кубическая объёмно-центрированная	Кубическая объёмно-центрированная
Параметры решётки, А°	a = 2,755 – 2,76 c = 4,449 – 4,458	3,140	3,158
Изотопы	185 (38,2%) 187 (61,8%)	92,94,96 97,98,100	180,182,183 184,186
Удельная электропроводность, Ом ⁻¹ ·см ⁻¹ , 10 ⁻⁴	16,4	-	-
Модуль упругости, кг/мм ²	47000	29200	36500
Температура рекристаллизации, °С	1300 - 1500	-	-
Сечение захвата тепловых нейтронов, барн	85	2,6	19,2
Давление пара при 2225°С, мм рт.ст.	1,18·10 ⁻⁶	-	-

По температуре плавления рений занимает второе место среди металлов, уступая лишь вольфраму, а по плотности стоит на четвёртом месте (после осмия, иридия и платины). Удельное сопротивление рения почти в четыре раза выше, чем у вольфрама и молибдена.

В отличие от вольфрама рений пластичен в литом и рекристаллизованном состоянии и может быть деформирован на холоде.

Рений обладает очень высоким модулем упругости. Так, по значению модуля упругости рений уступает только осмию и иридию. После небольшой степени деформации его твёрдость сильно возрастает до 800 НВ (проявляется сильный наклёп), но после отжига в защитной среде (водороде) или вакууме он вновь приобретает пластичность. Изделия из рения (в отличие от изделий из вольфрама) выдерживают многократные нагревы и охлаждения без потери прочности. Сварные швы не хрупкие. Горячая обработка на воздухе для рения невозможна, так как он обладает красноломкостью, вызываемой образованием по границам зёрен низкоплавкой семиокиси рения.

Прочность рения при температурах до 1200 – 1500°C выше, чем у вольфрама, и значительно превышает прочность молибдена.

Твёрдость по Бринеллю для рения составляет 250 кг/мм², предел прочности и удлинение при растяжении наращенной проволоки диаметром 0,25 мм составляет 50 кг/мм².

Рений обладает парамагнитными свойствами, практически не зависящими от температуры.

Механические свойства проволоки из металлического рения приведены в табл.2.4.

Таблица 2.4

**Механические свойства проволоки из
металлического рения**

Свойства	Материал	
	Отожжённая проволока	Деформированная на 15% проволока
Предел прочности, кг/мм ² , при 20°C	115	240
1000°C	56	84
1500°C	28	28
2000°C	14	14
Предел текучести, кг/мм ²	32	-
Удлинение при 20°C, %	24	-
Сужение площади поперечного сечения, %	20	-

Данные о влиянии температуры на некоторые электрические свойства рениевой проволоки (диаметром 0,234 мм, уд. вес 19,7 г/см³) приведены в табл.2.5.

Таблица 2.5

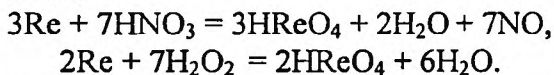
**Данные о влиянии температуры на электрические
свойства рениевой проволоки**

Температура, °C	0	20	120	2022	2217	2712
Удельное электросопротивление, 10 ⁻⁶ Ом·см	19,8	21,1	26,1	125,0	130,0	134,0
Средний температурный коэффициент электросопротивления, 10 ⁻³	3,11	3,11	-	2,23	2,14	1,98

Металлический компактный рений устойчив на воздухе при комнатной температуре. Окисление рения наблюдается при температурах выше 300°C, и значительно ускоряется при температурах выше 600°C. В атмосфере кислорода при нагревании свыше 400°C рений сгорает. Появление белого дыма говорит об образовании Re₂O₇, которая очень летуча. Во влажном воздухе рений медленно окисляется, причём конечным продуктом является рениевая кислота HReO₄. Рений устойчив в атмосфере водорода, в

восстановительных и нейтральных средах. Порошок рения адсорбирует водород. Азот не реагирует с металлическим рением даже при высоких температурах. Рений реагирует с галогенами, причём сила взаимодействия уменьшается от фтора к бром. При этом не образуются соединений рения высшей валентности. Рений взаимодействует с серой, фосфором и мышьяком при повышенных температурах с образованием сульфидов, фосфидов и арсенидов. С ртутью рений образует амальгаму.

Металлический рений хорошо растворяется в азотной кислоте, а также в перекиси водорода с образованием рениевой кислоты:



Перекись водорода в аммиачном растворе превращает металл, его окислы и сульфиды в перренат аммония. В мелкораздробленном состоянии металлический рений взаимодействует с щелочами при сплавлении, особенно в присутствии окислителей, таких как Na_2O_2 , KNO_3 , KClO_3 с образованием соответствующего перрената или высшего окисла.

Металлический рений не растворяется при комнатной температуре в растворах соляной, серной и фтористоводородной кислот. Горячая серная кислота реагирует с рением, переводя его в рениевую кислоту. Бромная вода легко растворяет металлический рений при небольшом нагревании.

Металлический рений в значительно меньшей степени, чем вольфрам, взаимодействует с окисью алюминия при высоких температурах в вакууме, что важно при его использовании в качестве подогревателя катодов в электронных приборах.

Рений устойчив по отношению к расплавам олова, цинка, меди и серебра. Расплавы железа и никеля легко растворяют рений.

Каталитическая активность рения проявляется в разного рода органических реакциях.

На рис.2.1 приведены потенциалы (В) окислительно – восстановительных процессов рения для различных растворов.

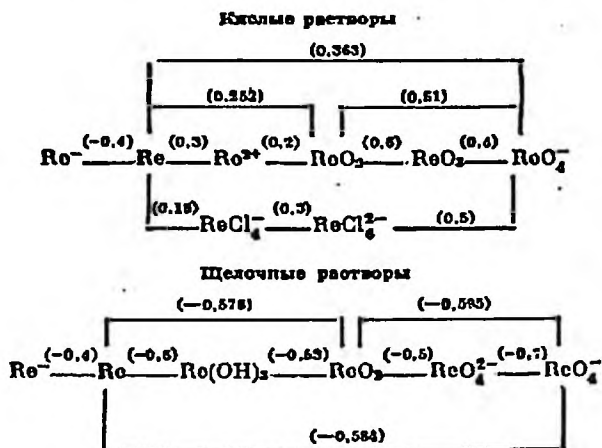
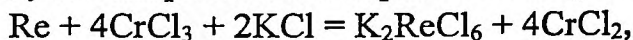


Рис.2.1. Потенциалы (В) окислительно – восстановительных процессов рения

Изучена коррозия металлического рения в хлоридных расплавах. Показано, что в расплавах, содержащих CrCl_3 , коррозия рения довольно значительна. Взаимодействие рения с исследуемыми расплавами протекает по реакции:



константа которой в интервале температур 700-800°С имеет порядок 10^{-2} - 10^{-3} .

2.3. Сплавы рения

Изучено около 100 диаграмм состояния систем рения с различными элементами. Наиболее полно изучено взаимодействие рения с переходными металлами.

В данном разделе мы остановимся на сплавах рения, получивших наиболее широкое распространение.

Диаграммы состояния рения с тугоплавкими металлами: ниобием, танталом, молибденом и вольфрамом приведены на рис.2.2.

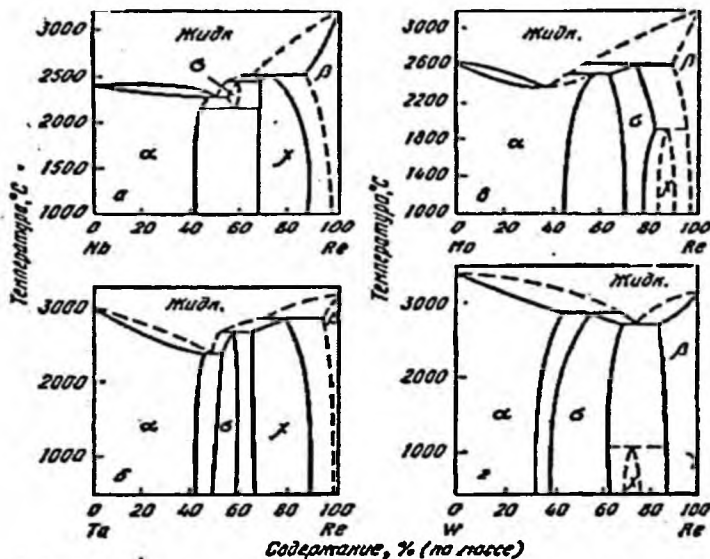


Рис.2.2. Диаграммы состояния сплавов рения с тугоплавкими металлами: а – Nb – Re; б – Ta – Re; в – Mo – Re; г – W – Re

Эти диаграммы характеризуются широкими областями твёрдых растворов. Сплавы системы рений – вольфрам готовились металлокерамическим способом и изучались рентгенографическим и микроструктурным методами. Температура плавления определялась оптическим пирометром. Установлено существование соединения Re_3W_2 , плавящегося при температуре $3007^\circ C$ и образующего с обоими компонентами две эвтектики: при 50% рения (2892°) и при 67% рения (2822°). Это соединение гомогенно в некотором интервале. Рентгенографически установлена растворимость соединения в вольфраме и отсутствие растворимости в рении.

Диаграмма состояния рения с молибденом позволяет утверждать об образовании в области, богатой рением, химического соединения состава, близкого к Re_3Mo_2 с содержанием рения 74,5% или Re_2Mo с содержанием рения 79,5%, и о наличии областей ограниченной взаиморастворимости компонентов.

Область твёрдых растворов со стороны молибдена значительно шире, чем со стороны рения, доходит

примерно до 50% рения в молибдене и менее 10% молибдена в рении.

Значительный интерес представляют сплавы рения и молибдена с содержанием рения 75 и 90%. Высокая твёрдость этих сплавов может позволить применять их либо самостоятельно, либо в качестве упрочнителей в многокомпонентных сплавах. Сплав с 90% содержанием рения, обладающий твёрдостью 550 кг/мм² при комнатной температуре, сохраняет твёрдость до 390-340 кг/мм² в интервале 400-800° и 220 кг/мм² при 1150°С. Этот сплав обладает также пластичностью как на холоде, так и при высоких температурах.

Некоторые физико-механические свойства сплавов рения с вольфрамом и молибденом приведены в табл. 2.6.

Таблица 2.6

Некоторые физико-механические свойства сплавов рения с вольфрамом и молибденом

Показатель	Сплав Mo – Re (47% Re)	Сплав W – Re (27% Re)
Кристаллическая решётка	ОЦК	ОЦК
Плотность, г/см ³	13,3	19,8
Температура начала рекристаллизации, °С	1350	1500
Температура плавления, °С	2500	3000
Коэффициент линейного термического расширения, 10 ⁻⁶ ·1/град (0-1000°С)	6,4	5,6
Удельное электросопротивление. мкОм·см (20°С)	23	30
Температура перехода в сверхпроводящее состояние, °К	10,9	4,2
Температура перехода в хрупкое состояние, °С	-254	-75
Модуль нормальной упругости, кг /мм ²	36400	41600
Модуль упругости при сдвиге, кг /мм ²	14000	16200
Угол изгиба сварного шва, град	180	75-90

Диаграмма состояния рений-железо приведена на рис. 2.3.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие.....	3
Глава I. Рений: вчера, сегодня, завтра.....	5
1.1. Исторический очерк	5
1.2. Области применения рения.....	9
1.3. Объём производства рения и конъюнктура цен на рений и его продукты	13
Глава II. Основные свойства рения и его соединений	18
2.1. Рений в Периодической системе элементов и изотопы рения.....	18
2.2. Металлический рений.....	21
2.3. Сплавы рения.....	26
2.4. Окислы рения	34
2.5. Рениевая кислота и её соли.....	41
2.6. Сульфиды (халькогениды) рения	48
2.7. Селениды и теллуриды рения.....	50
2.8. Галогениды рения.....	51
2.9. Нитриды, силициды, фосфиды, арсениды, карбиды, бориды и карбонилы рения.....	58
2.10. Комплексные соединения рения.....	60
2.10.1. Общие сведения.....	60
2.10.2. Галогенидные комплексные соединения.....	61
2.10.3. Цианидные и роданидные комплексные соединения	64
2.10.4. Комплексные соединения с оксикислотами.....	65
2.10.5. Комплексные соединения с этилендиаминтетра- уксусной кислотой и другими аминокислотами.....	67
2.10.6. Комплексные соединения с аминами и тиомоче- виной.....	67
2.10.7. Комплексные соединения с диоксимами, третичными фосфинами и арсинами.....	69
2.10.8. Органические соединения.....	70
2.11. Состояние рения в водных растворах.....	71
2.12. Комплексные соединения рениевой кислоты с аммиаком и тяжёлыми металлами	73
Глава III. Сырьевые источники получения рения.....	75
3.1. Геохимия рения	75
3.2. Типы месторождений ренийсодержащих руд.....	77

Глава IV. Обжиг сульфидных ренийсодержащих концентратов.....	85
4.1. Общие положения	85
4.2. Обжиг ренийсодержащих молибденитов.....	89
4.3. Обжиг ренийсодержащих сульфидных медных концентратов.....	97
4.4. Улавливание рения из газовой фазы.....	100
4.5. Восстановительная плавка медистых сланцев.....	103
4.6. Распределение рения и свинца между продуктами плавки	104
Глава V. Гидрометаллургия рения.....	107
5.1. Выщелачивание рения.....	107
5.1.1. Общие положения	107
5.1.2. Водное выщелачивание рения.....	116
5.1.3. Азотнокислое выщелачивание рения.....	117
5.1.4. Щелочное и содовое выщелачивание рения.....	119
5.1.5. Серноокислотное выщелачивание рения.....	124
5.1.6. Подземное выщелачивание рения.....	125
5.1.7. Аппаратурное оформление процессов выщелачивания.....	127
5.2. Сорбционное извлечение рения из растворов.....	141
5.2.1. Общие положения.....	141
5.2.2. Сорбция рения на активированных углях.....	152
5.2.3. Сорбция рения на ионообменных смолах.....	155
5.2.4. Отделение рения от молибдена и урана с использованием сорбции.....	173
5.2.5. Аппаратурное оформление процессов сорбции.....	177
5.2.5.1. Аппаратурное оформление процессов сорбции из пульп.....	177
5.2.5.2. Аппаратурное оформление процессов сорбции из растворов.....	183
5.3. Извлечение рения из растворов экстракцией органическими растворителями.....	195
5.3.1. Общие положения.....	195
5.3.2. Экстракция рения нейтральными органическими растворителями.....	204
5.3.3. Экстракция рения аминами.....	211

5.3.4. Экстракция рения четвертичными аммониевыми основаниями.....	217
5.3.5. Экстракционное отделение рения от молибдена и урана.....	219
5.3.6. Проблемы эмульгируемости растворов при экстракции рения и их решение.....	224
5.3.7. Проблемы потерь экстрагентов с рафинатами экстракции и их решение.....	226
5.3.8. Аппаратурное оформление процессов экстракции.....	228
5.4. Извлечение рения из растворов цементацией.....	235
5.4.1. Общие положения.....	235
5.4.2. Цементация рения.....	241
5.4.3. Аппаратурное оформление процесса цементации.....	244
5.5. Осаждение рения из растворов.....	246
5.5.1. Общие положения.....	246
5.5.2. Осаждение перрената калия и перрената аммония.....	248
5.5.3. Осаждение рения сульфидами и органическими осадителями.....	251
5.5.4. Осаждение рения при коагуляции полиэлектролитов.....	252
5.5.5. Осаждение рения в виде комплексной соли $[Zn(NH_3)_4](ReO_4)_2$	256
5.6. Извлечение рения из растворов ректификацией.....	257
5.7. Получение и перечистка перрената аммония электродиализом.....	261
5.7.1. Общие положения.....	261
5.7.2. Получение перрената аммония электродиализной конверсией из перрената калия.....	267
5.7.3. Получение перрената аммония электродиализом из молибденсодержащих растворов.....	271
5.7.4. Получение перрената аммония из аммиачных десорбатов электродиализом в промышленных условиях.....	273
5.8. Извлечение рения из растворов ионной флотацией.....	275
ГЛАВА VI. Технологические схемы извлечения рения и получения перренатов.....	279
6.1. Извлечение рения из пылей от обжига молибденита водным выщелачиванием.....	279
6.2. Извлечение рения из пылей от обжига молибденита с предварительным спеканием пыли с известью.....	285

6.3. Извлечение рения из молибденитовых концентратов.....	287
6.3.1. Извлечение рения из молибденитовых концентратов путём их азотнокислого разложения.....	287
6.3.2. Извлечение рения из молибденитовых концентратов путём их щелочного окислительного автоклавного выщелачивания.....	288
6.3.3. Извлечение рения из маточных растворов при переработке бедных молибденитовых концентратов с использованием адсорбции на активированном угле КАД.....	290
6.4. Извлечение рения из возгонов медеплавильных заводов.....	292
6.5. Извлечение рения из свинцового шлама очистки газов медеплавильного завода экстракцией ТАФО.....	295
6.6. Извлечение рения из свинцово - цинковых возгонов...	296
6.7. Извлечение рения из щелочных растворов экстракцией ЧАО.....	300
6.8. Извлечение рения из сернокислых растворов цементацией железом.....	301
6.9. Извлечение рения из растворов с применением полиэлектролитов (ПЭ).....	304
6.10. Извлечение рения из отработанных катализаторов.....	305
6.11. Извлечение рения из растворов подземного выщелачивания урана.....	306
6.12. Извлечение рения из сернокислотных шламов медеплавильного завода	312
6.13. Извлечение рения из цинк – кадмиевых растворов.....	313
6.14. Извлечение рения с применением красителей.....	314
6.15. Извлечение рения из сплавов.....	316
6.16. Извлечение рения из золы горючих сланцев.....	319
6.17. Извлечение рения в АО “Алмалыкском ГМК”.....	328
ГЛАВА VII. Металлургия рения.....	332
7.1. Восстановление перрената калия и аммония водородом	332
7.2. Получение рения электролизом.....	344
7.3. Получение рения методом термической диссоциации....	348
7.4. Получение компактного рения.....	350
7.5. Получение рениевых сплавов и полуфабрикатов.....	353
7.6. Получение рения из его оксида (VII) водородом.....	354

Глава VIII. Аналитическая химия рения	357
8.1. МВИ массовой концентрации рения в продуктах металлургического производства спектрофотометрическим методом...	357
8.2. МВИ массовой концентрации рения в минеральном сырье и продуктах металлургического производства атомно-абсорбционным методом.....	358
8.3. МВИ массовой концентрации рения в горных породах и сульфидных рудах кинетическим методом	360
8.4. МВИ массовой концентрации рения в технологических растворах фотометрическим методом.....	363
8.5. МВИ массовой доли рения в смоле фотометрическим методом.....	370
8.6. МВИ массовой доли рения методом полярографии постоянного тока.....	375
8.7. МВИ массовой доли рения методом инверсионной вольтамперометрии.....	377
8.8. МВИ массовой доли рения спектрографическим методом.....	379
8.9. МВИ массовой доли рения флуориметрическим методом.....	380
8.10. МВИ массовой доли рения нейтронно – активационным методом с радиохимическим выделением.....	382
8.11. МВИ массовой доли рения методом атомно – эмиссионной спектроскопии с индуктивно – связанной плазмой (ИСП – АЭ).....	384
Список использованной литературы.....	385

Для заметок

Для заметок

Научное издание

Петухов О.Ф., Санакулов К., Курбанов М.А., Шарафутдинов У.З.

РЕНИЙ

Редактор: Жилиева О.Б.

Тех. редактор: Хамидов А.А., Гуйева Ш.К.

Дизайнер: Содиков И.Ю.

Формат 60x84 ¹/₁₆. Гарнитура «Times New Roman».
Печать офсетная. Офсетная бумага. Услов. печ. л. 24,75.
Тираж: 300 шт. Заказ № 1848.

Отпечатано в типографии НГМК
г. Навои, ул. Южная, 25

