Содержание:

1. Положение актинидов в периодической таблице 2
2. Атинидная концепция 2
3. Электронные конфигурации актинидов 2
4. Степени окисления 3
5. Типы ионов 3
6. Источники 4
7. Получение 4
8. Общие характеристики, методы и история получения, химические свойства :

1) Уран 5

2) Плутоний 13

9. Практическое использование актинидных элементов 19

10. Список использованной литературы 21

1.ПОЛОЖЕНИЕ АКТИНИДОВ В ПЕРИОДИЧЕСКОЙ ТАБЛИЦЕ.

До 1944 года элементы торий, протактиний и уран располагались в периодической таблице непосредственно под элементами гафнием, танталом и волфрамом. Стало очевидным, что расположение трансурановых элементов в периодической таблице нуждается в радикальном перераспределении. Аргументы для расположения их как новой “актинидной” переходной серии, подобной РЗЭ, были обоснованы в 1944 году, но экспериментальные данные, подтверждающие такой взгляд, были еще скудными. По прошествии времени доказательства преимущества нового положения серии стали весьма основательными.

2.АКТИНИДНАЯ КОНЦЕПЦИЯ.

Актинидная концепция получила сейчас почти всеобщее признание с точки зрения положения трансурановых элементов в периодической системе. Поэтому здесь будет уместен краткий обзор ее основных принципов.

Актинидная концепция рассматривает элементы с 89 по 103 как переходную серию, первым членом которой является актиний (номер 89).Элементы с номерами 89-103 являются, таким образом, аналогами серии лантаноидов.

В отличие от лантаноидной серии, где четырнадцать 4f-электронов добавляются один за другим начиная с церия (номер58).В актинидной серии добавление четырнадцати 5f-электронов происходит последовательно формально начиная с тория (номер 90) и оканчивается на лоуренсии (номер 103).

Формально означает то что не существует доказательств, подтверждающих наличие у металлического тория или его соединений 5f-электронов. Однако протактиний содержит два 5f-электрона, предполагаемых для третьего члена актинидной серии.

Последующие элементы содержат соответствующий им набор 5f-электронов. Элементы с наполовину заполненными f-оболочками представляют интерес из-за повышенной устойчивости этих конфигураций, и вследствие этого наблюдается их сходство с аналогами лантаноидами. Принципиальные различия между двумя переходными сериями появляются из-за более низких энергий связи и меньшего эффекта экранирования внешними электронами 5f-электронов по сравнению с 4f-электронами. Как сходства, так и различия между актинидами и лантаноидами имеют огромное значение для изучения актинидных элементов.

3.ЭЛЕКТРОННЫЕ КОНФИГУРАЦИИ АКТИНИДОВ.

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Ac | Th | Pa | U | Np |
| 6d7s2 | 6d27s2 | 5f26d7s2 | 5f36d7s2 | 5f46d7s2 |

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Pu | Am | Cm | Bk | Cf |
| 5f67s2 | 5f77s2 | 5f76d7s2 | 5f97s2 | 5f107s2 |

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Es | Fm | Md | No | Lr |
| 5f117s2 | 5f127s2 | (5f137s2) | (5f147s2) | (5f146d7s2)или |
|  |  |  |  | (5f147s27p) |

4.СТЕПЕНИ ОКИСЛЕНИЯ АКТИНИДОВ.

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Атомный  номер | 89 | 90 | 91 | 92 | 93 | 94 | 95 | 96 | 97 | 98 | 99 | 100 | 101 | 102 | 103 |
| Элемент | Ас | Тh | Pa | U | Np | Pu | Am | Cm | Bk | Cf | Es | Fm | Md | No | Lr |
| Степень  Окисле-ния | 3 | (3)  4 | (3)  4  5 | 3  4  5  6 | 3  4  5  6  7 | 3  4  5  6  (7) | (2)  3  4  5  6  7? | 3  4  5?  6? | 3  4 | (2)  3  (4)  5? | (2)  3  4? | 2  3 | 1?  2  3 | 2  3 | 3 |

В скобках указаны неустойчивые степени окисления; степени окисления, существование которых достоверно не установлено, отмечены знаком вопроса.

За исключением тория и протактиния, все актинидные элементы существуют в водных растворах в трехвалентном состоянии, хотя оно не является предпочтительным или наиболее устойчивым окислительным состоянием в обычных условиях для элементов до америция. Устойчивое четырёхвалентное состояние наблюдается у элементов от тория до плутония и у берклия. Пятивалентное состояние надежно установлено для элементов от протактиния до америция, а шестивалентное от урана до америция. Четырехвалентное состояние кюрия ограничено несколькими твердыми соединениями, практически CmO2 и CmF4,и представлено в устойчивых комплексных ионах. Четырёхвалентное состояние калифорния ограничено твердыми соединениями CfO2 ,

CfF4. Двухвалентное состояние во второй половине ряда появляется у калифорния и становится все более устойчивым по мере продвижения к нобелию. Двухвалентные менделевий и нобелий наблюдались в водных растворах, а для нобелия это оказалось наиболее устойчивым состоянием. Двухвалентный америций встречался только в твердых соединениях. Образование четырехвалентного берклия, возможно, связано с повышенной устойчивостью наполовину заполненной 5f-оболочки (5f 7) ,а двухвалентное состояние нобелия отражает устойчивость полностью укомплектованной 5f-оболочки (5f 14).Необходимы большие усилия, чтобы все элементы от плутония до нобелия были получены в двухвалентном состоянии, и для того, чтобы утверждать, что двухвалентное состояние является устойчивым для элементов от фермия до нобелия. Однако подтверждений этому не имеется. Менделевий зарегистрирован в одновалентном состоянии, но доказательства существования моновалентных ионов актинидов сомнительны.

5.ТИПЫ ИОНОВ.

Ионы актинидов в различных степенях окисления имеют по существу различные структуры. В водных растворах при pH < 3 существуют четыре типа катионов актинидов. Ионы вида М3+ или М4+ ,аналогично катионам с высоким зарядом, проявляют большую склонность к сольватации, гидролизу и полимеризации. Для актинидных элементов в высших степенях окисления эффективный заряд простого иона уменьшается за счет образования оксигенированных форм общего вида МО2+ и МО22+.Актинильные ионы МО2+ и МО22+ в высшей степени устойчивы и в таком виде принимают участие в огромном количестве реакций.

6.ИСТОЧНИКИ.

Нахождение в природе.

Элементы от актиния до плутония встречаются в природе. Нептуний (237Np , 239Np) и плутоний (239Pu) присутствуют в природе в незначительных количествах как результат нейтронных реакций в урановых рудах. Долгоживущий 244Pu обнаружен в редкоземельном минерале бастнезите в количестве 1 часть на 1018 и, первичного происхождения. Только элементы торий, протактиний и уран присутствуют в природных объектах в количествах, позволяющих их извлечение. Более важно, что содержание тория и урана в некоторых минеральных образованиях настолько высоко, что позволяет добывать их путем обычных горных разработок. Наиболее богатые месторождения урана обнаружены в Северном Саскачеване в Канаде. Ведущими производителями урановой руды, для которых имеются статистические данные, являются Канада, Южная Африка, Австралия и Намибия. Выделение тория и урана из этих руд практиковалось за много лет до открытия трансурановых элементов, и существуют технологии для их выделения из различных руд.



Нейтронное облучение.

Актиний и протактиний являются продуктами распада естественного изотопа 235U и присутствуют в урановых минералах в таких низких концентрациях, что их выделение из природных образцов является весьма сложной и неблагодарной задачей. Для сравнения, имеется относительно простой метод получения актиния, протактиния и большинства отсутствующих в природе трансурановых элементов путём нейтронного облучения в ядерном реакторе элементов с меньшим атомным номером. Так, актиний может быть получен в мультиграмовых количествах путём взаимодействия радия с нейтронами, получающимися в высокопоточном ядерном реакторе:

226Ra+n=227Ra+γ

227Ra = 227Ac + β

Образовавшийся актиний может быть отделен от материнского радия экстракционным или ионообменным методом, и граммовые количества актиния были получены таким способом. Это совсем не легкая задача, принимая во внимание образование высокорадиоактивных веществ. Но предпочтительнее, чем выделение из природных источников.

7.ПОЛУЧЕНИЕ.

Актинидные металлы высокоэлектроположительны и реагируют с водяным паром, кислородом и, в мелкодисперсном состоянии, с азотом воздуха. Из-за α-активности актинидов для работы с ними необходимы прозрачные боксы с принудительной вентиляцией. Для некоторых тяжелых актинидов необходимы экраны, поглощающие нейтроны, образующиеся при спонтанном делении. Актинидные элементы образуют очень устойчивые оксиды и фториды, и необходимы сильные восстановители и высокая температура для восстановления их до металлов. Ранние получения актинидных металлов включали восстановление безводных три- или тетрафторидов металлическим литием или барием при высокой температуре. Напротив, оксиды актинидов восстанавливаются при высоких температурах металлическим лантаном или торием. Металлические актиниды могут быть получены из реакционной смеси достаточно чистым путём возгонки металла. Восстановление оксидов является предпочтительным способом для получения от милиграмовых до граммовых количеств Ac, Am, Cm, Bk, Cf и Es.Металлический уран, торий и плутоний получаются при обычных технологических операциях.

Многие современные исследования металлического состояния требуют очень чистых металлов. В зависимости от природы примесей металлические актиниды могут быть очищены отгонкой примесей в очень высоком вакууме, отгонкой самого металла с образованием пленки очень чистого металла, или путем электроосаждения из расплавов солей. Очень чистые металлы могут быть получены с помощью процесса Ван Аркеля, который состоит из превращения неочищенного металла в летучий йодид за счет реакции с элементарным йодом при повышенной температуре с последующим разложением газообразного йодида на раскалённой нити. При этом образуется чрезвычайно чистый металл, который используется для таких целей, как измерение сверхпроводимости, которое требует металл высочайшей чистоты.

8.ОБЩИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ, МЕТОДЫ И ИСТОРИЯ ПОЛУЧЕНИЯ, ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА УРАНА И ПЛУТОНИЯ:

**1) Уран**

Трудно сказать, какое имя дал бы немецкий ученый Мартин Клапрот открытому в 1789 году элементу, если бы за несколько лет до этого не произошло событие, взволновавшее все круги общества: в 1781 году английский астроном Вильям Гершель, наблюдая с помощью самодельного телескопа звездное небо, обнаружил светящееся облачко, которое он поначалу принял за комету, но в дальнейшем убедился, что видит новую, неизвестную дотоле седьмую планету солнечной системы. В честь древнегреческого бога неба Гершель назвал ее Ураном. Находившийся под впечатлением этого события, Клапрот дал новорожденному элементу имя новой планеты.

Спустя примерно полвека, в 1841 году, французский химик Эжен Пелиго сумел впервые получить металлический уран. Промышленный мир остался равнодушным к тяжелому, сравнительно мягкому металлу, каким оказался уран. Его механические и химические свойства не привлекли ни металлургов, ни машиностроителей. Лишь стеклодувы Богемии да саксонские мастера фарфоровых и фаянсовых дел охотно применяли окись этого металла, чтобы придать бокалам красивый желто-зеленый цвет или украсить блюда затейливым бархатно-черным узором.

О «художественных способностях» урановых соединений знали еще древние римляне. При раскопках, проведенных близ Неаполя, удалось найти стеклянную мозаичную фреску удивительной красоты. Археологи были поражены: за два тысячелетия стекла почти не потускнели. Когда образцы стекол подвергли химическому анализу, оказалось, что в них присутствует окись урана, которой мозаика и была обязана своим долголетием. Но, если окислы и соли урана занимались «общественно полезным трудом», то сам металл в чистом виде почти никого не интересовал.

Даже ученые, и те были лишь весьма поверхностно знакомы с этим элементом. Сведения о нем были скудны, а порой совершенно неправильны. Так, считалось, что его атомный вес равен приблизительно 120. Когда Д. И. Менделеев создавал свою Периодическую систему, эта величина путала ему все карты: уран по своим свойствам никак не хотел вписываться в ту клетку таблицы, которая была «забронирована» за элементом с этим атомным весом. И тогда ученый, вопреки мнению многих своих коллег, решил принять новое значение атомного веса урана — 240 и перенес элемент в конец таблицы. Жизнь подтвердила правоту великого химика:

атомный вес урана 238,03.

Но гений Д. И. Менделеева проявился не только в этом. Еще в 1872 году, когда большинство ученых считало уран на фоне многих ценных элементов своего рода «балластом», создатель Периодической системы сумел предвидеть его поистине блестящее будущее: «Между всеми известными химическими элементами уран выделяется тем, что обладает наивысшим атомным весом... Наивысшая, из известных, концентрация массы весомого вещества, ... существующая в уране, ... должна влечь за собою выдающиеся особенности... Убежденный в том, что исследование урана, начиная с его природных источников, поведет еще ко многим новым открытиям, я смело рекомендую тем, кто ищет предметов для новых исследований, особо тщательно заниматься урановыми соединениями».

Предсказание великого ученого сбылось менее чем через четверть века: в 1896 году французский физик Анри Беккерель, проводя эксперименты с солями урана, совершил открытие, которое по праву относится к величайшим научным открытиям, когда-либо сделанным человеком. Вот как это произошло. Беккерель давно интересовался явлением фосфоресценции (т. е. свечения), присущей некоторым веществам. Однажды ученый решил воспользоваться для своих опытов одной из солей урана, которую химики называют двойным сульфатом уранила и калия. На обернутую черной бумагой фотопластинку он поместил вырезанную из металла узорчатую фигуру, покрытую слоем урановой соли, и выставил ее на яркий солнечный свет, чтобы фосфоресценция была как можно более интенсивной. Через четыре часа Беккерель проявил пластинку и увидел на ней отчетливый силуэт металлической фигуры. Еще и еще раз повторил он свои опыты — результат был тот же. И вот 24 февраля 1896 года на заседании французской Академии наук ученый доложил, что у такого фосфоресцирующего вещества, как двойной сульфат уранила и калия, выставленного на свет, наблюдается невидимое излучение, которое проходит через черную непрозрачную бумагу и восстанавливает соли серебра на фотопластинке.

Спустя два дня Беккерель решил продолжить эксперименты, но как на грех погода была пасмурной, а без солнца какая же фосфоресценция? Досадуя на непогоду, ученый спрятал уже приготовленные, но так и не подвергшиеся освещению диапозитивы вместе с образцами солей урана в ящик своего стола, где они пролежали несколько дней. Наконец, в ночь на 1 марта ветер очистил парижское небо от туч и солнечные лучи с утра засверкали над городом. Беккерель, с нетерпением ожидавший этого, поспешил в свою лабораторию и извлек из ящика стола диапозитивы, чтобы выставить их на солнце. Но, будучи очень педантичным экспериментатором, он в последний момент все же решил проявить диапозитивы, хотя логика, казалось бы, подсказывала, что за прошедшие дни с ним ничего не могло произойти: ведь они лежали в темном ящике, а без света не фосфоресцирует ни одно вещество. В этот миг ученый не подозревал, что через несколько часов обычным фотографическим пластинкам ценой в несколько франков, суждено стать бесценным сокровищем, а день 1 марта 1896 года навсегда войдет в историю мировой науки.

То, что Беккерель увидел на проявленных пластинках, буквально поразило его: черные силуэты образцов резко и четко обозначились на светочувствительном слое. Значит, фосфоресценция здесь ни при чем. Но тогда, что же это за лучи испускает соль урана? Ученый снова и снова проделывает аналогичные опыты с другими соединениями урана, в том числе и с теми, которые не обладали способностью фосфоресцировать или годами лежали в темном месте, и каждый раз на пластинках появлялось изображение.

У Беккереля возникает пока еще не вполне ясная мысль, что уран представляет собой «первый пример металла, обнаруживающего свойство, подобное невидимой фосфоресценции».

В это же время французскому химику Анри Муассану удалось разработать способ получения чистого металлического урана. Беккерель попросил у Муассана немного уранового порошка и установил, что излучение чистого урана значительно интенсивнее, чем его соединений, причем это свойство урана оставалось неизменным при самых различных условиях опытов, в частности при сильном нагревании и при охлаждении до низких температур.

С публикацией новых данных Беккерель не спешил: он ждал, когда Муассан сообщит о своих весьма интересных исследованиях. К этому обязывала научная этика. И вот 23 ноября 1896 года на заседании Академии наук Муассан сделал доклад о работах по получению чистого урана, а Беккерель рассказал о новом свойстве, присущем этому элементу, которое заключалось в самопроизвольном делении ядер его атомов. Это свойство было названо радиоактивностью.

Открытие Беккереля ознаменовало собой начало новой эры в физике — эры превращения элементов. Отныне атом уже не мог считаться единым и неделимым—перед наукой открывался путь в глубины этого «кирпичика» материального мира.

Естественно, что теперь уран приковал к себе внимание ученых. Вместе с тем их интересовал и такой вопрос: только ли урану присуща радиоактивность? Быть может, в природе существуют и другие элементы, обладающие этим свойством?

Ответ на этот вопрос смогли дать выдающиеся физики супруги Пьер Кюри и Мария Складовская-Кюри. С помощью прибора, сконструированного мужем, Мария Кюри исследовала огромное количество металлов, минералов, солей. Работа велась в неимоверно тяжелых условиях. Лабораторией служил заброшенный деревянный сарай, который супруги подыскали в одном из парижских дворов. «Это был барак из досок, с асфальтовым полом и стеклянной крышей, плохо защищавшей от дождя, без всяких приспособлений, — вспоминала впоследствии М. Кюри. — В нем были только старые деревянные столы, чугунная печь, не дававшая достаточно тепла, и классная доска, которой так любил пользоваться Пьер. Там не было вытяжных шкафов для опытов с вредными газами, поэтому приходилось делать эти операции на дворе, когда позволяла погода, или же в помещении при открытых окнах». В дневнике П. Кюри есть запись о том, что порой работы проводились при температуре всего шесть градусов выше нуля.

Много проблем возникало и с получением нужных материалов. Урановая руда, например, была очень дорогой, и купить на свои скромные средства достаточное количество ее супруги Кюри не могли. Они решили обратиться к австрийскому правительству с просьбой продать им по невысокой цене отходы этой руды, из которой в Австрии извлекали уран, используемый в виде солей для окрашивания стекла и фарфора. Ученых поддержала венская Академия наук, и несколько тонн отходов было доставлено в их парижскую лабораторию.

Мария Кюри работала с необыкновенным упорством. Изучение разнообразных материалов подтверждало правоту Беккереля, считавшего, что радиоактивность чистого урана больше любых его соединений. Об этом говорили результаты сотен опытов. Но Мария Кюри подвергала исследованиям все новые и новые вещества. И вдруг... Неожиданность! Два урановых минерала — хальколит и смоляная руда Богемии — гораздо активнее действовали на прибор, чем уран. Вывод напрашивался сам собой: в них содержится какой-то неизвестный элемент, характеризующийся еще более высокой способностью к радиоактивному распаду. В честь Польши— родины М. Кюри—супруги назвали его полонием.

Снова за работу, снова титанический труд — и еще победа: открыт элемент, в сотни раз превосходящий по радиоактивности уран. Этот элемент ученые назвали радием, что по-латыни означает «луч».

Открытие радия в какой-то мере отвлекло научную общественность от урана. В течение примерно сорока лет он не очень волновал умы ученых, да и инженерная мысль редко баловала его своим вниманием. В одном из томов технической энциклопедии, изданном в 1934 году, утверждалось: «Элементарный уран практического применения не имеет». Солидное издание не грешило против истины, но спустя всего несколько лет жизнь внесла существенные коррективы в представления о возможностях урана.

В начале 1939 года появились два научных сообщения. Первое, направленное во французскую Академию наук Фредериком Жолио-Кюри, было озаглавлено «Экспериментальное доказательство взрывного расщепления ядер урана и тория под действием нейтронов». Второе сообщение— его авторами были немецкие физики Отто Фриш и Лиза Мейтнер — опубликовал английский журнал «Природа»; оно называлось: «Распад урана под действием нейтронов: новый вид ядерной реакции». И там, и там речь шла о новом, доселе неизвестном явлении, происходящем с ядром самого тяжелого элемента — урана.

Еще за несколько лет до этого ураном всерьез заинтересовались «мальчуганы» — именно так дружелюбно называли группу молодых талантливых физиков, работавших под руководством Энрико Ферми в Римском университете. Увлечением этих ученых была нейтронная физика, таившая в себе много нового, неизведанного.

Было обнаружено, что при облучении нейтронами, как правило, ядра одного элемента превращаются в ядра другого, занимающего следующую клетку в Периодической системе. А если облучить нейтронами последний, 92-й элемент—уран? Тогда должен образоваться элемент, стоящий уже на 93-м месте—элемент, который не смогла создать даже природа!

Идея понравилась «мальчуганам». Еще бы, разве не заманчиво узнать, что собой представляет искусственный элемент, как он выглядит, как ведет себя? Итак, уран облучен. Но что произошло? В уране появился не один радиоактивный элемент, как ожидалось, а по меньшей мере, десяток. Налицо была какая-то загадка в поведении урана. Энрико Ферми направляет сообщение об этом в один из научных журналов. Возможно, считает он, образовался 93-й элемент, но точных доказательств этого нет. Но, с другой стороны, есть доказательства, что в облученном уране присутствуют какие-то другие элементы. Но какие?

Попытку дать ответ на этот вопрос предприняла дочь Марии Кюри— Ирен Жолио-Кюри. Она повторила опыты Ферми и тщательно исследовала химический состав урана после облучения его нейтронами. Результат был более чем неожиданным: в уране появился элемент лантан, располагающийся примерно в середине таблицы Менделеева, т. е. очень далеко от урана.

Когда те же эксперименты проделали немецкие ученые Отто Ган и Фридрих Штрассман, они нашли в уране не только лантан, но и барий. Загадка за загадкой!

Ган и Штрассман сообщили о проведенных опытах своему другу известному физику Лизе Мейтнер. Теперь уже урановую проблему пытаются решить сразу несколько крупнейших ученых. И вот, сначала Фредерик Жолио-Кюри, а спустя некоторое время Лиза Мейтнер приходят к одному и тому же выводу: при попадании нейтрона ядро урана как бы разваливается на части. Этим и объясняется неожиданное появление лантана и бария — элементов с атомным весом, примерно вдвое меньшим, чем у урана.

Американского физика Луиса Альвареса, впоследствии лауреата Нобелевской премии, это известие застало в одно январское утро 1939 года в кресле парикмахера. Он спокойно просматривал газету, как вдруг ему бросился в глаза скромный заголовок: «Атом урана разделен на две половины».

Через мгновение к изумлению парикмахера и посетителей, ожидавших очереди, странный клиент выбежал из парикмахерской, наполовину подстриженный, с салфеткой, туго завязанной вокруг шеи и развевающейся на ветру. Не обращая внимания на удивленных прохожих, физик мчался в лабораторию Калифорнийского университета, где он работал, чтобы сообщить о потрясающей новости своим коллегам. Те поначалу были ошарашены весьма оригинальным видом размахивающего газетой Альвареса, но, когда услышали о сенсационном открытии, тотчас же забыли о его необычной прическе.

Да, это была подлинная сенсация в науке. Но Жолио-Кюри установил и другой важнейший факт: распад уранового ядра носит характер взрыва, при котором образующиеся осколки разлетаются в стороны с огромной скоростью. Пока удавалось расколоть лишь отдельные ядра, энергия осколков только нагревала кусок урана. Если же число делений будет велико, то при этом выделится огромное количество энергии.

Но где раздобыть такое количество нейтронов, чтобы одновременно бомбардировать ими большое число ядер урана? Ведь известные ученым источники нейтронов давали их во много миллиардов раз меньше, чем требовалось. На помощь пришла сама природа. Жолио-Кюри обнаружил, что при делении ядра урана из него вылетает несколько нейтронов. Попав в ядра соседних атомов, они должны привести к новому распаду— начнется так называемая цепная реакция. А поскольку эти процессы длятся миллионные доли секунды, сразу выделится колоссальная энергия— неизбежен взрыв. Казалось бы, все ясно. Но ведь куски урана уже не раз облучали нейтронами, а они при этом не взрывались, т. е. цепная реакция не возникала. Видимо, нужны еще какие-то условия. Какие же? На этот вопрос Фредерик Жолио-Кюри ответить пока не мог.

И все же ответ был найден. Нашли его в том же 1939 году молодые советские ученые Я. Б. Зельдович и Ю. Б. Харитон. В своих работах они установили, что есть два пути развития цепной ядерной реакции. Первый— нужно увеличить размеры куска урана, так как при облучении маленького куска многие выделившиеся вновь нейтроны могут вылететь из него, не встретив на своем пути ни одного ядра. С ростом массы урана вероятность попадания нейтрона в цель, естественно, возрастает.

Есть и другой путь: обогащение урана изотопом 235. Дело в том, что природный уран имеет два основных изотопа, атомный вес которых равен 238 и 235. В ядре первого из них, на долю которого приходится в 140 раз больше атомов, имеется на три нейтрона больше. «Бедный» нейтронами уран-235 жадно их поглощает — гораздо сильней, чем его «зажиточный» брат, который даже не делится на части, а превращается в другой элемент. Это свойство изотопа ученые в дальнейшем использовали для получения искусственных трансурановых элементов. Для цепной же реакции равнодушие урана-238 к нейтронам оказывается губительным: процесс чахнет, не успев набрать силу. Зато чем больше в уране «жадных» до нейтронов атомов изотопа 235, тем энергичнее пойдет реакция.

Но, чтобы начался процесс, нужен еще и первый нейтрон—та «спичка», которая должна вызвать атомный «пожар». Конечно, для этой цели можно воспользоваться обычными нейтронными источниками, которые ученые и ранее применяли в своих исследованиях, — не очень удобно, но можно. А нет ли более подходящей «спички»?

Есть. Ее нашли другие советские ученые К. А. Петржак и Г. Н. Флеров. Исследуя в 1939—1940 годах поведение урана, они пришли к выводу, что ядра этого элемента способны распадаться самопроизвольно. Это подтвердили результаты опытов, проведенных ими в одной из ленинградских лабораторий. Но, может быть, уран распадался не сам, а, например, под действием космических лучей: ведь Земля непрерывно находится под их обстрелом. Значит, опыты нужно повторить глубоко под землей, куда не проникают эти космические гости. Посоветовавшись с крупнейшим советским ученым-атомником И. В. Курчатовым, молодые исследователи решили провести эксперименты на какой-нибудь станции Московского метрополитена. В Наркомате путей сообщения это не встретило препятствий, и вскоре в кабинет начальника станции метро «Динамо», находившейся на глубине 50 метров, на плечах научных работников была доставлена аппаратура, которая весила около трех тонн.

Как всегда, мимо проходили голубые поезда, тысячи пассажиров спускались и поднимались по эскалатору, и никто из них не предполагал, что где-то совсем рядом ведутся опыты, значение которых трудно переоценить. И вот, наконец, получены результаты, аналогичные тем, которые наблюдались в Ленинграде. Сомнения не было: ядрам урана присущ самопроизвольный распад. Чтобы заметить его, нужно было проявить незаурядное экспериментаторское мастерство: за 1 час из каждых

60 000 000 000 000 атомов урана распадается лишь один. Поистине — капля в море!

К. А. Петржак и Г. Н. Флеров вписали заключительную страницу в ту часть биографии урана, которая предшествовала проведению первой в мире цепной реакции. Ее осуществил 2 декабря 1942 года Энрико Ферми.

В конце 30-х годов Ферми, как и многие другие крупные ученые, спасаясь от гитлеровской чумы, вынужден был эмигрировать в Америку. Здесь он намеревался продолжить свои важнейшие эксперименты. Но для этого требовалось немало денег. Нужно было убедить американское правительство в том, что опыты Ферми позволят получить мощное атомное оружие, которое можно будет использовать для борьбы с фашизмом. Эту миссию взял на себя ученый с мировым именем Альберт Эйнштейн. Он пишет письмо президенту США Франклину Рузвельту, которое начинается словами: «Сэр! Последняя работа Э. Ферми и Л. Сцилларда, с которой я ознакомился в рукописи, позволяет надеяться, что элемент уран в ближайшем будущем может быть превращен в новый важный источник энергии...». В письме ученый призывал правительство начать финансирование работ по исследованию урана. Учитывая огромный авторитет Эйнштейна и серьезность международной обстановки, Рузвельт дал свое согласие.

В конце 1941 года жители Чикаго могли заметить царившее на территории одного из стадионов необычное оживление, которое не имело к спорту ни малейшего отношения. К воротам его то и дело подъезжали машины с грузом. Многочисленная охрана не разрешала посторонним даже приближаться к ограде стадиона. Здесь, на теннисных кортах, расположенных под западной трибуной, Энрико Ферми готовил свой опаснейший эксперимент — осуществление контролируемой цепной реакции деления ядер урана. Работы по сооружению первого в мире ядерного реактора велись днем и ночью в течение года.

Наступило утро 2 декабря 1942 года. Всю ночь ученые не смыкали глаз, снова и снова проверяя расчеты. Шутка ли сказать: стадион находится в самом центре многомиллионного города, и хотя расчеты убеждали в том, что реакция в атомном котле будет замедленной, т. е. не будет носить взрывного характера, рисковать жизнью сотен тысяч людей никто не имел права. День уже давно начался, пора было завтракать, но об этом все забыли —не терпелось как можно скорее приступить к штурму атома. Однако Ферми не торопится: надо дать уставшим людям отдохнуть, нужна разрядка, чтобы затем снова все тщательно взвесить и обдумать. Осторожность и еще раз осторожность. И вот, когда все ждали команду начать эксперимент, Ферми произнес свою знаменитую фразу, вошедшую в историю покорения атома,—всего два слова: «Идемте-ка завтракать!».

Завтрак позади, все вновь на своих местах — опыт начинается. Взгляды ученых прикованы к приборам. Томительны минуты ожидания. И, наконец, счетчики нейтронов защелкали, как пулеметы. Они словно захлебывались от огромного количества нейтронов, не успевая их считать! Цепная реакция началась! Это произошло в 15 часов 25 минут по чикагскому времени. Атомному огню позволили гореть 28 минут, а затем по команде Ферми цепная реакция была прекращена.

Один из участников эксперимента подошел к телефону и заранее условленной шифрованной фразой сообщил начальству: «Итальянский мореплаватель добрался до Нового Света!» Это означало, что выдающийся итальянский ученый Энрико Ферми освободил энергию атомного ядра и доказал, что человек может контролировать и использовать ее по своей воле.

Но воля воле рознь. В те годы, когда происходили описываемые события, цепная реакция рассматривалась прежде всего как этап на пути к созданию атомной бомбы. Именно в этом направлении и были продолжены в Америке работы ученых-атомников.

Обстановка в научных кругах, связанных с этими работами, была крайне напряженной. Но и здесь не обходилось без курьезов.

Осенью 1943 года решено было попытаться вывезти из оккупированной немцами Дании в Америку крупнейшего физика Нильса Бора, чтобы использовать его громадные знания и талант. Темной ночью на рыбацком суденышке, тайно охраняемом английскими подводными лодками, ученый под видом рыбака был доставлен в Швецию, откуда его на самолете должны были переправить в Англию, а уж затем в США.

Весь багаж Бора состоял из одной бутылки. Эту обычную зеленую бутылку из-под датского пива, в которой он тайком от немцев хранил бесценную тяжелую воду, физик берег как зеницу ока: по мнению многих ученых-атомников, именно тяжелая вода могла служить замедлителем нейтронов для ядерной реакции.

Бор очень тяжело перенес утомительный полет и, как только пришел в себя, первым делом проверил, цела ли бутылка с тяжелой водой. И тут, к своему великому огорчению, ученый обнаружил, что стал жертвой собственной рассеянности: в его руках была бутылка с самым настоящим датским пивом, а сосуд с тяжелой водой остался дома в холодильнике.

Когда на гигантских заводах Ок-Риджа, расположенных в штате Теннесси, был получен первый небольшой кусочек урана-235, предназначенный для атомной бомбы, его отправили со специальным курьером в скрытый среди каньонов штата Нью-Мексико Лос-Аламос, где создавалось это смертоносное оружие. Курьеру, которому предстояло самому вести машину, не сказали, что находится в переданной ему коробочке, но он не раз слышал жуткие истории о таинственных «лучах смерти», рождаемых в Ок-Ридже. Чем дальше он ехал, тем большее волнение охватывало его. В конце концов, он решил, при первом же подозрительном признаке в поведении коробочки, спрятанной позади его, бегать от машины что есть мочи.

Проезжая по длинному мосту, шофер внезапно услышал сзади громкий выстрел. Словно катапультированный, он выскочил из автомобиля и побежал так быстро, как еще никогда не бегал в своей жизни. Но вот, пробежав изрядное расстояние, он остановился в изнеможении, убедился, что цел и невредим, и даже отважился оглянуться. А тем временем за его машиной уже вырос длинный хвост нетерпеливо сигналивших автомобилей. Пришлось возвращаться и продолжать путь.

Но едва он сел за руль, как снова раздался громкий выстрел, и инстинкт самосохранения опять буквально выбросил беднягу из машины и заставил мчаться прочь от злополучной коробочки. Лишь после того, как разгневанный полисмен догнал его на мотоцикле и увидел правительственные документы, испуганный шофер узнал, что выстрелы доносились с соседнего полигона, где в это время испытывали новые артиллерийские снаряды.

Работы в Лос-Аламосе велись в обстановке строжайшей тайны. Все крупные ученые находились здесь под вымышленными именами. Так, Нильс Бор, например, был известен в Лос-Аламосе как Николае Бейкер, Энрико Ферми был Генри Фармером, Юджин Вигнер — Юджином Вагнером.

Однажды, когда Ферми и Вигнер выезжали с территории одного секретного завода, их остановил часовой. Ферми предъявил свое удостоверение на имя Фармера, а Вигнер не смог найти своих документов. У часового был список тех, кому разрешалось входить на завод и выходить из него. «Ваша фамилия?»—спросил он. Рассеянный профессор сначала по привычке пробормотал «Вигнер», но тут же спохватился и поправился: «Вагнер». Это вызвало подозрение у часового. Вагнер был в списке, а Вигнер — нет. Он повернулся к Ферми, которого уже хорошо знал в лицо, и спросил: «Этого человека зовут Вагнер?». «Его зовут Вагнер. Это так же верно, как и то, что я Фармер», — спрятав улыбку, торжественно заверил часового Ферми, и тот пропустил ученых.

Примерно в середине 1945 года работы по созданию атомной бомбы, на которые было израсходовано два миллиарда долларов, завершились, и 6 августа над японским городом Хиросимой возник гигантский огненный гриб, унесший десятки тысяч жизней. Эта дата стала черным днем в истории цивилизации. Величайшее достижение науки породило величайшую трагедию человечества.

Перед учеными, перед всем миром встал вопрос: что же дальше? Продолжать совершенствовать ядерное оружие, создавать еще более ужасные средства уничтожения людей?

Нет! Отныне колоссальная энергия, заключенная в ядрах атомов, должна служить человеку. Первый шаг на этом пути сделали советские ученые под руководством академика И. В. Курчатова. 27 июня 1954 года московское радио передало сообщение исключительной важности: «В настоящее время в Советском Союзе усилиями советских ученых и инженеров успешно завершены работы по проектированию и строительству первой промышленной электростанции на атомной энергии полезной мощностью 5000 киловатт». Впервые по проводам шел ток, который нес энергию, рожденную в недрах атома урана.

«Это историческое событие,—писала в те дни газета «Дейли Уор-кер»,—имеет неизмеримо большее международное значение, чем сброс первой атомной бомбы на Хиросиму...».

Пуск первой атомной электростанции положил начало развитию новой отрасли техники — ядерной энергетики. Уран стал мирным горючим XX века.

Прошло еще пять лет, и со стапелей советских судоверфей сошел первый в мире атомный ледокол «Ленин». Чтобы заставить работать его двигатели во всю мощь (44 тысячи лошадиных сил!), нужно «сжечь» всего несколько десятков граммов урана. Небольшой кусок этого ядерного топлива способен заменить тысячи тонн мазута или каменного угля, которые вынуждены в буквальном смысле тащить за собой обычные теплоходы, совершающие, например/рейс Лондон—Нью-Йорк. А атомоход «Ленин» с запасом уранового топлива несколько десятков килограммов может в течение трех лет сокрушать льды Арктики, не заходя в порт на «заправку».

В 1974 году «приступил к исполнению своих обязанностей» еще более мощный атомный ледокол—«Арктика».

С каждым годом доля ядерного горючего в мировом балансе энергоресурсов становится все ощутимее. В наше время каждая четвёртая лампочка в России светит из-за АЭС. Преимущества этого вида топлива несомненны. Но не стоит забывать об опасности радиации. Миллионы людей пострадали. Среди них больше 100 000 погибли из-за ужасной аварии на Чернобыльской АЭС в 1986 году. Да и сейчас территория около ЧАЭС заражена и не пригодна для житья. Пройдёт ещё не менее ста лет, прежде чем человек сможет вернуться и жить там. Но и без аварий не так всё гладко. Ведь использование уранового топлива сопряжено со многими трудностями, из которых едва ли не важнейшая — уничтожение образующихся радиоактивных отходов. Спускать их в специальных контейнерах на дно морей и океанов? Зарывать их глубоко в землю? Вряд ли такие способы позволят полностью решить проблему: ведь в конечном счете смертоносные вещества при этом остаются на нашей планете. А не попытаться ли отправить их куда-нибудь подальше—на другие небесные тела? Именно такую идею выдвинул один из ученых США. Он предложил грузить отходы атомных электростанций на «грузовые» космические корабли, следующие по маршруту Земля—Солнце. Разумеется, сегодня подобные «посылки» дороговато обошлись бы отправителям, но, по мнению некоторых оптимистически настроенных специалистов, уже через 10 лет эти транспортные операции станут вполне оправданными.

В наше время уже не обязательно обладать богатой фантазией, чтобы предсказать великое будущее урана. Уран завтра—это космические ракеты, устремленные в глубь Вселенной, и гигантские подводные города, обеспеченные энергией на десятки лет, это создание искусственных островов и обводнение пустынь, это проникновение к самым недрам Земли и преобразование климата нашей планеты.

Сказочные перспективы открывает перед человеком уран — пожалуй, наиболее удивительный металл природы!

**2) Плутоний**

С элементом № 94 связаны очень большие надежды и очень большие опасения человечества.

...Вначале были протоны — галактический водород. В результате его сжатия и последовавших затем ядерных реакций образовались самые невероятные «слитки» нуклонов. Среди них, этих «слитков», были, по-видимому, и содержащие по 94 протона. Оценки теоретиков позволяют считать, что около ста нуклонных образований, в состав которых входят 94 протона и от 107 до 206 нейтронов, настолько стабильны, что их можно считать ядрами изотопов элемента № 94.

Но все эти изотопы — гипотетические и реальные — не настолько стабильны, чтобы сохраниться до наших дней с момента образования элементов солнечной системы. Период полураспада самого долгоживущего изотопа элемента № 94 — 75 миллионов лет. Возраст Галактики измеряется миллиардами лет. Следовательно, у «первородного» плутония не было шансов дожить до наших дней. Если он и образовывался при великом синтезе элементов Вселенной, то те давние его атомы давно «вымерли», подобно тому как вымерли динозавры и мамонты.

В XX веке новой эры, нашей эры, этот элемент был воссоздан. Из ста возможных изотопов плутония синтезированы двадцать пять. У пятнадцати из них изучены ядерные свойства. Четыре нашли практическое применение.

С того дня, когда первые ядра элемента № 94 попали к ученым, прошло 34 года. В декабре 1940 года при облучении урана ядрами тяжелого водорода группа американских радиохимиков во главе с Гленном Т. Сиборгом обнаружила неизвестный прежде излучатель альфа частиц. с периодом полураспада 90 лет. Этим излучателем оказался изотоп элемента № 94 с массовым числом 238. В том же году, но несколькими месяцами раньше Э. М. Макмиллан и Ф. Эйбельсон получили первый элемент, более тяжелый, чем уран, — элемент № 93. Этот элемент назвали нептунием, а 94-й — плутонием. Историк определенно скажет, что названия эти берут начало в римской мифологии, но в сущности происхождение этих названий скорее не мифологическое, а астрономическое.

**Астрономическая параллель**

Элемент, занимающий 92-ю клетку менделеевской таблицы, был открыт Мартином Клапротом в 1789 году и назван ураном в честь самой далекой из известных тогда планет (ее впервые наблюдал знаменитый астроном Уильям Гершель в 1781 году, за восемь лет до открытия Клапрота.)

Не Уран оказался последней планетой солнечной системы. Еще дальше от Солнца проходит орбита Нептуна, но и Нептун не последний, за ним — Плутон, планета, о которой до сих пор почти ничего не известно... Подобное построение наблюдается и на «левом фланге» менделеевской таблицы: uranium — neptunium—plutonium, однако о плутонии человечество знает намного больше, чем о Плутоне. Кстати, Плутон астрономы открыли всего за десять лет до синтеза плутония, — почти такой же отрезок времени разделял открытия Гершеля и Клапрота.

**"Древо познания добра и зла"**

В 1941 году был открыт важнейший изотоп плутония — изотоп с массовым числом 239. И почти сразу же подтвердилось предсказание теоретиков: ядра плутония-239 делились тепловыми нейтронами. Более того, в процессе их деления рождалось не меньшее число нейтронов, чем при делении урана-235. Тотчас же были намечены пути получения этого изотопа в больших количествах...

Прошли годы. Теперь уже ни для кого не секрет, что, ядерные бомбы, хранящиеся в арсеналах, начинены плутонием-239 и что их, этих бомб, достаточно, чтобы, как говорят, «нанести непоправимый ущерб» всему живому на Земле.

Распространено мнение, что с открытием цепной ядерной реакции (неизбежным следствием которого стало создание ядерной бомбы) человечество явно поторопилось. Можно думать по-другому или делать вид, что думаешь по-другому, — приятнее быть оптимистом. Но и перед: оптимистами неизбежно встает вопрос об ответственности ученых. Мы помним триумфальный июньский день 1954 года, день, когда дала ток первая атомная электростанция в Обнинске. Но мы не можем забыть и августовское утро 1945 года — «утро Хиросимы», «черный день Альберта Эйнштейна»... Те, кому сегодня семьдесят и больше, помнят первые послевоенные годы и безудержный атомный шантаж — основу американской политики тех лет. А разве мало тревог пережило человечество в последующие годы?

Причем эти тревоги многократно усиливались сознанием, что, если вспыхнет новая мировая война, ядерное оружие непременно будет пущено в ход.

Здесь можно попробовать доказать, что открытие плутония не прибавило человечеству опасений, что, напротив, оно было только полезно.

Допустим, случилось так, что по какой-то причине или, как сказали бы в старину, по воле божьей, плутоний оказался недоступен ученым. Разве уменьшились бы тогда наши страхи и опасения? Ничуть не бывало. Ядерные бомбы делали бы из урана-235 (и в не меньшем количестве, чем из плутония), и эти бомбы «съедали» бы еще большие, чем сейчас, части бюджетов.

ато без плутония не существовало бы перспективы мирного использования ядерной энергии в больших масштабах. Для «мирного атома» просто не хватило бы урана-235. Зло, нанесенное человечеству открытием ядерной энергии, не уравновешивалось бы, пусть даже частично, достижениями «доброго атома».

**Энергия камней**

Оценим энергетические ресурсы, заключенные в природных запасах урана.

Уран — рассеянный элемент, и практически он есть всюду. Каждому, кто побывал, к примеру, в Карелии, наверняка запомнились гранитные валуны и прибрежные скалы. Но мало кто знает, что в тонне гранита в среднем содержится от 4 до 10 граммов урана. Граниты составляют почти 20% веса земной коры. Если считать только уран-235, то в тонне гранита заключено 6 · 106 килокалорий энергии. Это очень много, но...

На переработку гранита и извлечение из него урана нужно затратить еще большее количество энергии — порядка 106 -107 килокалорий. Вот если бы удалось в качестве источника энергии использовать не только уран-235, а и уран-238, тогда гранит можно было бы рассматривать хотя бы как потенциальное энергетическое сырье. Тогда энергия, полученная из тонны камня, составила бы уже от 8 ·107 до 2 ·108 килокалорий. Это равноценно 16— 40 тоннам угля. И в этом случае гранит мог бы дать людям почти в миллион раз больше энергии, чем все запасы химического топлива на Земле.

Но ядра урана-238 нейтронами не делятся. Для атомной энергетики этот изотоп бесполезен. Точнее, был бы бесполезен, если бы его не удалось превратить в плутоний-239. И что особенно важно: на это ядерное превращение практически не нужно тратить энергию — напротив, в этом процессе энергия производится!

Попробуем разобраться, как это происходит, но вначале несколько слов о природном плутонии.

**В 400 тысяч раз меньше, чем радия**

Уже говорилось, что изотопы плутония не сохранились со времени синтеза элементов при образовании нашей планеты. Но это не означает, что плутония в Земле нет. Он все время образуется в урановых рудах. Захватывая нейтроны космического излучения и нейтроны, образующиеся при самопроизвольном (спонтанном) делении ядер урана-238, некоторые — очень немногие — атомы этого изотопа превращаются в атомы урана-239. Эти ядра очень нестабильны, они испускают электроны и тем самым повышают свой заряд. Образуется нептуний — первый трансурановый элемент. Нептуний-239 тоже весьма неустойчив, и его ядра испускают электроны. Всего за 56 часов половина нептуния-239 превращается в плутоний-239, период полураспада которого уже достаточно велик — 24 тысячи лет.

Почему не добывают плутоний из урановых руд? Мала, слишком мала концентрация. «В грамм добыча — в год труды» — это о радии, а плутония в рудах содержится в 400 тысяч раз меньше, чем радия. Поэтому не только добыть — даже обнаружить «земной» плутоний необыкновенно трудно. Сделать это удалось только после того, как были изучены физические и химические свойства плутония, полученного в атомных реакторах.

**Когда 2,70 >> 2,23** (напомним, что в математике знак >> означает «много больше»)

Накапливают плутоний в ядерных реакторах (до недавнего времени эти установки называли также атомными котлами). В мощных потоках нейтронов происходит та же реакция, что ив урановых рудах, но скорость образования и накопления плутония в реакторе намного выше — в миллиард миллиардов раз. Для реакции превращения балластного урана-238 в энергетический плутоний-239 создаются оптимальные (в пределах допустимого) условия.

Если реактор работает на тепловых нейтронах (напомним, что их скорость — порядка двух тысяч метров в секунду, а энергия — доли электрон-вольта), то из естественной смеси изотопов урана получают количество плутония немногим меньшее, тем количество «выгоревшего» урана-235. Немногим, но меньшее, плюс неизбежные потери плутония при химическом выделении его из облученного урана. К тому же цепная ядерная реакция поддерживается в природной смеси изотопов урана только до тех пор, пока не израсходована незначительная доля урана-235. Отсюда закономерен вывод: «тепловой» реактор на естественном уране — основной тип ныне действующих реакторов — не может обеспечить расширенного воспроизводства ядерного горючего. Но что же тогда перспективно? Для ответа на этот вопрос сравним ход цепной ядерной реакции в уране-235 и плутоний-239 и введем в наши рассуждения еще одно физическое понятие.

Важнейшая характеристика любого ядерного горючего — среднее число нейтронов, испускаемых после того, как ядро захватило один нейтрон. Физики называют его эта -числом обозначают греческой буквой- θ. В «тепловых» реакторах на уране наблюдается такая закономерность: каждый нейтрон «порождает» в среднем 2,08 нейтрона (θ =2,08). Помещенный в такой реактор плутоний под действием тепловых нейтронов дает θ=2,03. Но ведь есть еще реакторы, работающие на быстрых нейтронах. Естественную смесь изотопов урана в такой реактор загружать бесполезно: цепная реакция не пойдет. Но если обогатить «сырье» ураном-235, она сможет развиться и, в «быстром» реакторе. При этом θ будет равно уже 2,23. А плутоний, помещенный под обстрел быстрыми нейтронами, даст θ равное 2,70. В наше распоряжение поступит «лишних полнейтрона». И это совсем не мало.

Проследим, на что тратятся полученные нейтроны. В любом реакторе один нейтрон нужен для поддержания цепной ядерной реакции. 0,1 нейтрона поглощается конструктивными материалами установки. «Избыток» идет на накопление плутония-239. В одном случае «избыток» равен 1,13, в другом — 1,60. После «сгорания» килограмма плутония в «быстром» реакторе выделяется энергия в 2,25 · 107 и накапливается 1,6 кг плутония. А уран и в «быстром» реакторе даст ту же энергию и 1,1 кг нового ядерного горючего. И в том, и в другом случае налицо расширенное воспроизводство. Но нельзя забывать об экономике.

В силу ряда технических причин цикл воспроизводства плутония занимает несколько лет. Допустим, что пять лет. Значит, в год количество плутония увеличится только на 2%, если θ = 2,23, и на 12%, если θ = 2,7! Ядерное горючее — капитал, а всякий капитал должен давать, скажем, 5% годовых. В первом случае налицо большие убытки, а во втором — большая прибыль. Этот примитивный пример иллюстрирует «вес» каждой десятой числа θ в проблеме ядерной энергетики.

Важно и другое. Ядерная энергетика должна поспевать за ростом потребности в энергии. Расчеты показывают: это условие выполнимо в будущем только тогда, когда θ приближается к трем. Если же развитие ядерных энергетических источников будет отставать от потребностей общества в энергии, то останется два пути: либо «затормозить прогресс», либо брать энергию из каких-то других источников.

**Извлечение**

Когда в результате ядерных реакций в уране накопится необходимое количество плутония, его необходимо отделить не только от самого урана, но и от осколков деления — как урана, так и плутония, выгоревших в цепной ядерной реакции. Кроме того, в урано -плутониевой массе есть и некоторое количество нептуния. Сложнее всего отделить плутоний от нептуния и редкоземельных элементов (лантаноидов). Плутонию как химическому элементу в какой-то мере не повезло. С точки зрения химика, главный элемент ядерной энергетики — всего лишь один из четырнадцати актинидов. Подобно редкоземельным элементам, все элементы актиниевого ряда очень близки между собой по химическим свойствам, строение внешних электронных оболочек атомов всех элементов от актиния до 103-го одинаково. Еще неприятнее, что химические свойства актинидов подобны свойствам редкоземельных элементов, а среди осколков деления урана и плутония лантаноидов хоть отбавляй. Но зато 94-й элемент может находиться в пяти валентных состояниях, и это «подслащивает пилюлю» — помогает отделить плутоний и от урана, и от осколков деления.

Валентность плутония меняется от трех до семи. Химически наиболее стабильны (а следовательно, наиболее распространены и наиболее изучены) соединения четырехвалентного плутония.

Разделение близких по химическим свойствам актинидов — урана, нептуния и плутония — может быть основано на разнице в свойствах их четырех- и шестивалентных соединений. Сначала урановые бруски растворяют в азотной кислоте. Азотная кислота — сильный окислитель при растворении и уран, и плутоний, и примеси окисляются. Нульвалентные атомы плутония превращаются в ионы Рu6+. Плутоний растворяется вместе с ураном. Из этого раствора его восстанавливают до трехвалентного состояния сернистым газом, а затем осаждают фторидом лантана. Осадок кроме плутония содержит нептуний редкоземельные элементы. Но основная масса вещества уран — остается в растворе и отделяется от плутония.

Полученный осадок растворяют вновь и окисляют нептуний до четырехвалентного состояния броматом калия. На плутоний этот реактив не действует, и при вторичном осаждении тем же LаF3 трехвалентный плутоний переходит в осадок, а нептуний остается в растворе.

Чтобы отделить осколки дарения, плутоний снова окисляют до шестивалентного состояния и вновь добавляют фторид лантана. Теперь редкоземельные элементы переходят в осадок, а плутоний остается в растворе...

Из множества известных ныне методов выделения плутония следует упомянуть об экстракции плутония органическими растворителями и выделении плутония на ионообменных колонках. Эти методы представляются химикам, работающим с плутонием, наиболее перспективными.

**Металл**

Теперь, наконец, о металле. Выделить соединения плутония из раствора — задача несложная. Известны десятки способов, позволяющих это сделать. Затем полученные соединения плутония превращают в химически чистый тетрафторид PuF4, который при 1200° С восстанавливают парами бария. Так получают чистый плутоний. Но это еще не конструкционный материал: тепловыделяющие элементы энергетических ядерных реакторов (или даже детали атомной бомбы) из него не сделать. Почему? Нужна как минимум, «болванка» — отливка. При изготовлении плутониевых изделий пользуются преимущественно методом литья. Температура плавления металлического плутония — 640° С — вполне достижима, но...

Перелив расплавленный плутоний из тигля в нужную форму, начинают его охлаждать до комнатной температуры, — в процессе затвердевания в отливке непременно появятся трещины. Может быть, охлаждение идет слишком быстро? Как ни меняли режимы, отливка неизменно разрушалась. Значит, загвоздка не в температурном режиме. Что же тогда происходит ?

В жидком металле атомы движутся беспорядочно. С понижением температуры, когда металл начинает затвердевать, атомы уже колеблются около центров, расположенных в строго определенном порядке, например в вершинах кубов, тетраэдров и т. д., в зависимости от кристаллического строения того или иного металла.

В кристаллах атомы упакованы, как правило, плотнее, чем в жидкостях. Большинство веществ, исключая лед, типографский сплав гарт и немногие другие, затвердевая, уменьшаются в объеме — плотность их увеличивается.

Плутоний начинает затвердевать при температуре 640° С, при этом его атомы образуют кристаллическую решетку в виде кубов. По мере уменьшения температуры плотность металла постепенно растет. Но вот температура достигла 480° С, и тут неожиданно плотность плутония резко падает. До причин этой аномалии докопались довольно быстро: при этой температуре атомы плутония перестраиваются в кристаллической решетке. Она становится тетрагональной и очень «рыхлой». Такой плутоний может плавать в собственном расплаве, как лед на воде.

Температура продолжает падать, вот она достигла 451° С, и атомы снова образовали кубическую решетку, но расположились на большем, чем в первом случае, расстоянии друг от друга. При дальнейшем охлаждение решетка становится сначала орторомбической, затем моноклинной. Всего плутоний образует шесть различных кристаллических форм. Две из них отличаются замечательным свойством — отрицательным коэффициентом температурного расширения: с ростом температуры металл не расширяется, а сжимается. Совершенно необычное поведение!

Когда температура достигает 122° С и атомы плутония в шестой раз перестраивают свои ряды, плотность меняется особенно сильно — от 17,77 до 19,82 г/см3. Больше чем на 10%! Соответственно уменьшается объем слитка. Если против напряжений, возникавших на других переходах, металл еще мог устоять, то в этот момент разрушение неизбежно.

Как же тогда изготовить деталь из этого удивительного металла? Металлурги легируют плутоний (добавляют в него незначительные количества нужных элементов) и получают отливки без единой трещины. Из них и делают плутониевые заряды ядерных бомб. Вес заряда (он определяется прежде всего критической массой изотопа) 5—6 килограммов. Он без труда поместился бы в кубике с размером ребра 10 сантиметров.

**Тяжелые изотопы**

В плутонии-239 в незначительном количестве содержатся и высшие изотопы этого элемента — с массовыми числами 240 и 241. Изотоп 240Рu практически бесполезен — это балласт в плутонии. Из 241-го получают америций — элемент № 95. В чистом виде, без примеси других изотопов, плутоний-240 и плутоний-241 можно получить при электромагнитном разделении плутония, накопленного в реакторе. Перед этим плутоний дополнительно облучают нейтронными потоками со строго определенными характеристиками. Конечно, все это очень сложно, тем более что плутоний не только радиоактивен, но и весьма токсичен. Работа с ним требует исключительной осторожности.

Один из самых интересных изотопов плутония — 242Рu можно подучить, облучая длительное время 239Рu в потоках нейтронов. 242Рu очень редко захватывает нейтроны и потому «выгорает» в реакторе медленнее остальных изотопов; он сохраняется и после того, как остальные изотопы плутония почти полностью перешли в осколки или превратились в плутоний-242.

Плутоний-242 важен как «сырье» для сравнительно быстрого накопления высших трансурановых элементов в ядерных реакторах. Если в обычном реакторе облучать плутонии-239, то на накопление из граммов плутония микрограммовых количеств, к примеру, калифорния-251 потребуется около 20 лет.

Можно сократить время накопления высших изотопов, увеличив интенсивность потока нейтронов в реакторе. Так и делают, но тогда нельзя облучать большое количество плутония-239. Ведь этот изотоп делится нейтронами, и в интенсивных потоках выделяется слишком много энергии. Возникают дополнительные сложности с охлаждением контейнера и реактора. Чтобы избежать этих сложностей, пришлось бы уменьшить количество облучаемого плутония. Следовательно, выход калифорния стал бы снова мизерным. Замкнутый круг!

Плутоний-242 тепловыми нейтронами не делится, его*,* и в больших количествах можно облучать в интенсивных нейтронных потоках... Поэтому в реакторах из этого изотопа «делают» и накапливают в весовых количествах все элементы от калифорния до эйнштейния.

**Не самый тяжелый, но самый долгоживущий**

Всякий раз, когда ученым удавалось получить новый изотоп плутония, измеряли период полураспада его ядер. Периоды полураспада изотопов тяжелых радиоактивных ядер с четными массовыми числами меняются закономерно. (Этого нельзя сказать о нечетных изотопах.)

Посмотрите на график, в котором отражена зависимость периода полураспада четных изотопов плутония от массового числа. С увеличением массы растет и «время жизни» изотопа. Несколько лет назад высшей точкой этого графика был плутоний-242. А дальше как пойдет эта кривая — с дальнейшим ростом массового числа? В точку 1, которая соответствует времени жизни 30 миллионов лет, или в точку 2, которая отвечает уже 300 миллионам лет? Ответ на этот вопрос был очень важен для наук о Земле. В первом случае, если бы пять миллиардов лет назад Земля целиком состояла из 244Рu, сейчас во всей массе, Земли остался бы только один атом плутония-244. Если же верно второе предположение, то плутоний-244 может быть в Земле в таких концентрациях, которые уже можно было бы обнаружить. Если бы посчастливилось найти в Земле этот изотоп, наука получила бы ценнейшую информацию о процессах» происходивших при формировании нашей планеты.

Несколько лет назад перед учеными встал вопрос: стоит ли пытаться найти тяжелый плутоний в Земле? Для ответа на него нужно было прежде всего определить период полураспада плутония-244. Теоретики не могли рассчитать эту величину с нужной точностью. Вся надежда была только на эксперимент.

Плутоний-244 накопили в ядерном реакторе. Облучали элемент № 95 — америций (изотоп 243Аm). Захватив нейтрон, этот изотоп переходил в америций-244; америций в одном из десяти тысяч случаев переходил в плутоний-244.

Из смеси америция с кюрием выделили препарат плутония-244. Образец весил всего несколько миллионных-долей грамма. Но их хватило для того, чтобы определить период полураспада этого интереснейшего изотопа. Он оказался равным 75 миллионам лет. Плутоний-244 немного «не дотянул», чтобы сохраниться в Земле со времен синтеза элементов в концентрациях, которые еще можно обнаружить.

Много попыток предпринимали ученые, чтобы найти изотоп трансуранового элемента, живущий дольше, чем 244Рu. Но все попытки остались тщетными. Одно время возлагали надежды на кюрий-247, но после того, как этот изотоп был накоплен в реакторе, выяснилось, что его период полураспада всего 14 миллионов лет. Побить рекорд плутония-244 не удалось, — это самый долгоживущий из всех изотопов трансурановых элементов.

Еще более тяжелые изотопы плутония подвержены β-распаду, и их время жизни лежит в интервале от нескольких дней до нескольких десятых секунды. Мы знаем наверное, что в термоядерных взрывах образуются все изотопы плутония, вплоть до 257Рu. Но их время жизни — десятые доли секунды, и изучить многие короткоживущие изотопы плутония пока не удалось.

**Возможности первого изотопа**

И напоследок — о плутонии-238 — самом первом из «Рукотворных» изотопов плутония, изотопе, который вначале казался бесперспективным. В действительности это очень интересный изотоп. Он подвержен α-распаду, т. е. его ядра самопроизвольно испускают α-частицы — ядра гелия. α-частицы, порожденные ядрами плутония, несут большую энергию; рассеявшись в веществе, эта энергия превращается в тепло. Как велика эта энергия? Шесть миллионов электрон-вольт освобождается при распаде одного атомного ядра плутония-238. В химической реакции та же энергия выделяется при окислении нескольких миллионов атомов. В источнике электричества, содержащем один килограмм плутония-238, развивается тепловая мощность 560 ватт. Максимальная мощность такого же по весу химического источника тока — 5 ватт.

Существует немало излучателей с подобными энергетическими характеристиками, но одна особенность плутония-238 делает этот изотоп незаменимым. Обычно альфа-распад сопровождается сильным гамма-излучением, проникающим через большие толщи вещества. 238Рu — исключение. Энергия γ-квантов, сопровождающих распад его ядер, невелика, защититься от нее несложно: излучение поглощается тонкостенным контейнером. Мала и вероятность самопроизвольного деления ядер этого изотопа. Поэтому он нашел применение не только в источниках тока, но и в медицине. Батарейки с плутонием-238 служат источником энергии в специальных стимуляторах сердечной деятельности. Создан проект искусственного сердца с изотопным источником. На все эти нужды в ближайшие три-четыре года потребуется несколько тонн «легкого» плутония.

Но 238Рu не самый легкий из известных изотопов элемента № 94, получены изотопы плутония с массовыми числами от 232 до 237. Период полураспада самого легкого изотопа — 36 минут.

Плутоний — большая тема. Хотелось рассказать главное из самого главного. Ведь уже стала стандартной фраза, что химия плутония изучена гораздо лучше чем химия, таких «старых» элементов, как железо. О ядерных свойствах плутония написаны целые книги. Металлургия плутония — еще один удивительный раздел человеческих знаний... Поэтому не нужно думать, что, прочитав этот рассказ, вы по-настоящему узнали плутоний — важнейший металл XX века.

9.ПРАКТИЧЕСКОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АКТИНИДНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ.

Основным применением актинидных элементов является производство ядерной энергии. Хотя это очень важный аспект для любых актинидных элементов, неожиданно обнаружился ряд других практических применений. Они включают использование короткоживущих актинидных изотопов для портативных энергетических батарей спутников, в ионизационных детекторах дыма, лечении рака, нейтронной радиографии, разведке минералов и нефтеразработке, как нейтронные источники в пускателях ядерных реакторов и в множестве аналитических методов, наиболее важными из которых являются нейтронно-активационный анализ и десорбционная масс-спектроскопия тяжелых ионов.

Америций-241 нашел применение в диагностике нарушений щитовидной железы. Миниатюрные электрические генераторы, использующие 238Pu , разработаны для применения в кардиостимуляторах. Сам кардиостимулятор – это устройство, расположенное в грудной клетке и соединенное с сердечной мышцей; периодически испускается запрограммированный электрический импульс, который обеспечивает ритмичность сердцебиения. Кардоистимуляторы на химических батареях имеют ограниченный срок службы и должны периодически замениться хирургическим способом. Ядерный иссточник тока увеличивает время между перезарядками по крайней мере в 5 раз. Обычный ядерно-энергетический кардиостимулятор содержит около 160 мг 238Pu, заключенного в корпус из сплава тантала, иридия и плотины. В мире широко используются несколько тысяч таких приборов.

Калифорний-252 давно привлек внимание как возможный терапевтический реагент для лечения рака. Общее впечатление, складывающееся из первых публикаций на эту тему, таково, что нейтронная терапия хуже рентгеновской. Однако многие последние работы показывают, что нейтронное облучение в некоторых случаях более эффективно, чем рентгеновское или гамма облучение. За 1976-1982 годы были подвергнуты нейтронному облучению калифорнием-152 несколько сотен людей, больных раком. Нейтронное облучение оказывается особенно полезным при лечении опухолей, в которых нарушено снабжение тканей кислородом и которые по этому относительно не восприимчивы к рентгеновским и гамма лучами. В нестоящее время использование нейтронов для лечения рака находится еще в стадии эксперимента, однако не исключена возможность, что при дальнейших клинических исследованиях нейтроноизлучающие изотопы калифорния смогут найти хорошее применение в терапии.

**Список использованной литературы:**

1.”Химия актиноидов” Т1 (1991), Т2 (1997), Т3 (1999). Ред.: Дж.Кац, Г. Сиборг и Л.Морсс.

2.”Химия актинидных элементов” (1960) Г.Сиборг, Дж. Кац

3.”Закономерности изменения свойств лантаноидов и актиноидов” (1990) Г.В.Ионова , В.И. Спицин.

4.Информация полученная из интернета.