



Художник С. Дергачев

Изотопная экономика

Как ядерная энергетика будет развиваться в XXI веке? Настоящая статья основана на материале, который автор подготовил в результате глубокого исследования этого вопроса и опубликовал в 2006 году в американском журнале «Executive Intelligence Review». Это исследование не представляет собой попытку предсказать грядущие перемены, но сконцентрировано на наиболее интересных и характерных чертах грядущего развития ядерной энергетики и смежных отраслей. На первом месте среди них стоит революция в использовании изотопов и ядерных свойств вещества.



Детище ядерной энергетики

В двадцать первом веке произойдет переход к использованию ядерных реакций в качестве основного источника энергии для мировой экономики. Не будем обсуждать этот тезис, а примем его как данность. На первом этапе перехода от углеводородной к ядерной энергетике основное внимание будет уделено созданию такого топливного цикла, который позволит утилизировать энергию не только урана, но и других видов ядерного сырья, например плутония и тория. Поэтому возникнет потребность в массовом разделении изотопов — без этого невозможно полностью утилизировать энергию ядерного топлива. Усилия по созданию таких производств приведут к появлению изотопной экономики, которая означает вовлечение в производство всего многообразия изотопов химических элементов. Сегодня их число превышает три тысячи. А значит, вместо Таблицы Менделеева с 92 стабильными элементами мы получаем гораздо более сложную Систему изотопов.

Поначалу внимание ученых и технологов будет сосредоточено на тысяче стабильных и долгоживущих изотопов. Потом, если будут отработаны физические методы увеличения периодов полураспада короткоживущих изотопов или даже стабилизации их, такие изотопы тоже могут приобрести экономическое значение. С другой стороны, число известных изотопов будет постоянно увеличиваться за счет синтеза сверхтяжелых ядер, а также необычных изотопов известных элементов. Каждый из них, обладая уникальным набором свойств, порой аномальных, принесет нам новые возможности.

Все перечисленное выше может показаться читателю научной фантастикой или в лучшем случае футурологией. На самом деле изотопная экономика уже находится на этапе становления — это не будущее, а настоящее.

Ядерный реактор как атомная фабрика

При изотопной экономике в массовых масштабах осуществляется трансмутация элементов — производство изотопов для нужд промышленности. Сейчас такая трансмутация происходит в ядерных реакторах, поскольку реакция ядерного деления, начавшись с единственного тяжелого изотопа, ^{235}U , ^{238}U или ^{232}Th , дает широкий спектр различных изотопов почти всех элементов Периодической таблицы. Прежде всего это легкие изотопы — продукты деления. В реакторе возникает и инструмент трансмутации — потоки нейтронов: попадая в ядра других элементов в окружающем реактор веществе, они могут переводить их в нестабильное состояние. Уже сейчас, регулируя спектр нейтронов, которые образуются при реакции деления, и изменяя состав топлива, можно влиять на состав продуктов деления.

Именно в этом направлении — производство изотопов и получение электроэнергии в качестве дополнительного продукта — и будет развиваться ядерная энергетика. Экономическое значение изотопов, которые производят с помощью ядерных реакторов, в каком-то смысле уже пре-

восходит ценность попутно созданной электроэнергии. В частности, отработанное ядерное топливо представляет собой источник ценных металлов. Помимо большого количества радиоактивных изотопов и ядерного топлива вроде ^{239}Pu , в который превращается под нейтронным облучением ^{238}U , ядерные реакторы дают немало промышленно важных металлов, таких, как палладий, родий и рутений. Доказано, что извлечение этих металлов из отработанного топлива для катализаторов, специальных сплавов и коррозионно-прочных материалов экономически оправдано, а их доля при полной переработке всего топлива, ежегодно извлекаемого из АЭС, составили бы значительную часть их мировой добычи из минералов. Отмечая, что их концентрация в топливе в десятков тысяч — миллионы раз выше, чем среднее содержание в земной коре, японские исследователи недавно заявили, что отработанное топливо — самая ценная среди известных человечеству руд.

Для того чтобы полностью использовать содержащийся в ядерных реакторах потенциал, нужно замкнуть ядерный топливный цикл. Это означает, что облученное топливо должно пройти полную химическую переработку: полезные изотопы извлечены, делящиеся изотопы отправлены в реактор, а нежелательные изотопы подвергнуты трансмутации либо в ускорителе, либо в специальных реакторах для сжигания ядерных отходов. Все это в деталях проработано в ядерных лабораториях мира, и часть технологий уже опробована в промышленных масштабах.

Например, существуют так называемые высокопоточные ускорители протонов. Помимо исследований в области ядерной физики, на подобных ускорителях с помощью протонных пучков проводят операции по удалению опухолей. Однако, направив поток быстрых нейтронов на вольфрамовую мишень, удастся получать мощный поток нейтронов. С его помощью можно исследовать материалы, а можно проводить трансмутацию макроскопических количеств вещества: таким методом делают некоторые изотопы для массовых медицинских исследований. Во многих лабораториях мира создают подобные системы трансмутации для переработки ядерных отходов — если в ядро долгоживущего радиоактивного изотопа добавить нейтроны, оно станет совсем нестабильным и быстро распадется. Одна-единственная система, состоящая из подкритического реактора для сжигания ядерных отходов с мощностью пучка протонов 20 МВт, способна переработать долгоживущие изотопы из топлива, собранного с 10 АЭС, и в результате их распада получится 800 МВт тепловой энергии!

Следующим шагом к изотопной экономике будет сочетание возможностей реакторов ядерного деления (в том числе реакторов на быстрых нейтронах) и ускорителей с термоядерным синтезом. В конце XX века термоядерная энергетика сильно продвинулась вперед. В 1997 году экспериментальный реактор ДжЕТ (Объединенный европейский тор) в английском Кулхэме с помощью термоядерного синтеза достиг мощности более 16 МВт энергии, удержав нагретую до 100 млн. градусов плазму в течение нескольких секунд. ИТЕР, Международный термоядерный экспериментальный реактор, который строят во Кадараше (Франция), должен достичь средней мощности 500 МВт за один шестиминутный импульс, которые станут следовать каждые полчаса. Огромные потоки нейтронов, возникающие при реакции дейтерия с тритием в термоядерном реакторе, позволят гораздо быстрее осуществлять трансмутации различных элементов или превращать те же ^{238}U или ^{232}Th в топливо для ядерных реакторов.

Трансмутация, контролируемая лазером

Достиженные за последние пять лет успехи в создании мощных фемтосекундных и рентгеновских лазеров позволяют инициировать трансмутацию элементов непосредственно с помощью когерентного света. Некоторые из настольных лазеров, которые ныне имеются в большинстве уважающих себя физических лабораторий, могут создавать огромные плотности энергии в коротких импульсах: до 10^{19} Вт/см². Этого хватает, чтобы возбуждать в веществе гамма-излучение или разгонять заряженные частицы до энергий, достаточных для инициации ядерных реакций. Иначе говоря, с помощью настольной лазерной установки можно проводить эксперименты, для которых совсем недавно требовались огромные ускорители.

Например, с использованием крупного лазера «Пета-ватт» сотрудникам Ливерморской лаборатории в 1999 году удалось вызвать распад ядра ²³⁸U. Однако вскоре в Йенском университете им. Фридриха Шиллера этот опыт повторили с настольным лазером. Эксперимент с большим английским лазером «ВУЛКАН» показал, что импульсами можно превратить долгоживущий ¹²⁹I (период полураспада 1,5 млн. лет) в короткоживущий ¹²⁸I с периодом 25 минут. Подобные методы, если они достигнут совершенства, окажутся действенным способом дезактивации отработанного топлива. Уменьшение длины волны излучения лазера существенно повышает эффективность таких фотоядерных реакций, а еще не созданный гамма-лазер, видимо, совершит в этой области революцию.

Разделение изотопов

После того как трансмутация проведена, изотопы надо разделить. Технология разделения изотопов, ранее монополизированная оружейниками, в конце XX века претерпела революционные изменения. Прорыв, связанный с лазерным и плазменным разделением изотопов, в том числе плазменная центрифуга, ионный циклотронный резонанс и другие, обещает огромные преимущества. Обычные методы, такие, как высокоскоростные центрифуги, диффузионные процессы или электромагнитное разделение, были усовершенствованы, и сейчас их можно применять для гораздо большего числа изотопов. Кроме того, окончание холодной войны высвободило для гражданских нужд военные мощности, предназначенные для разделения изотопов как в США, так и в СССР. Это не только увеличило ассортимент имеющихся на рынке изотопов, но и снизило их стоимость, а также позволило искать для них новые приложения.

Разработка термоядерного реактора делает возможным создание так называемого плазменного факела. Используя удерживаемую магнитным полем плазму, можно разделить на изотопы любое вещество. Такая технология обеспечивает полностью безотходное производство: абсолютно все бытовые и промышленные отходы можно будет разложить на составляющие атомы, разделить их на группы, собрать по отдельности и применить по назначению. Человек научится создавать необходимые ему атомы, причем порой в количестве, гораздо большем, чем можно получить из природных источников. Параллельно с производством химических элементов будет развиваться технология переработки руд с помощью высокотемпературной плазмы; в результате резко вырастет перечень полезных ископаемых.

Поскольку плотность энергии плазмы может быть очень большой, она оказывается абсолютным растворителем. Любое вещество, попав в достаточно нагретую плазму, распадется на ионы и электроны. А далее эти ионы можно разделить в сепараторе. Самый известный способ —

центрифуга: изотопы разной массы вращаются с разной скоростью и разделяются по фракциям. Управляющее магнитное поле способно раскрутить плазму в кольце реактора до скоростей в тысячи раз больше, чем в механической центрифуге, обеспечивая несравнимо более качественное разделение, и такие плазменные центрифуги уже созданы. В будущем разделение изотопов будет проходить также с использованием электромагнитных полей или возбуждения волновых и вращательных движений непосредственно в плазменном жгуте.

В США обсуждают первые приложения принципов плазменного факела для утилизации радиоактивных веществ, которые накопились в хранилищах за полсотни лет производства ядерного оружия. Этот экспериментальный факел будет снабжен внешним источником энергии, а после создания промышленного термоядерного реактора переработка отходов и разделение изотопов будут происходить одновременно с выработкой электроэнергии.

Изотопные материалы

Сейчас и производство изотопов, и потребность в них растут по экспоненте, что вызвано медицинским использованием радиоактивных изотопов. Только в США за год проводят 10 миллионов диагностических процедур такого рода. В будущем изотопы понадобятся для тонкого влияния на самые разные физические процессы, причем как в неживой природе, так и в живых организмах. Прежде всего речь идет о различиях в массах изотопов и в магнитных свойствах их ядер, от которых зависят сверхтонкое взаимодействие и ядерный магнитный резонанс.

Возможности, которые открывает перед нами химия разных изотопов, значительно превосходят число таких изотопов. Возьмем, например, органическую молекулу, каркас которой состоит из четырех несимметрично расположенных атомов углерода. Если учесть, что каждое место из этой четверки может быть занято либо ¹²C, либо ¹³C, получаем 16 вариантов, которые, обладая одинаковой структурой, будут различаться своими тонкими магнитными и другими свойствами. Добавив долгоживущий изотоп ¹⁴C, получаем уже 81 вариант. В этой молекуле содержится десять атомов водорода. Они тоже могут быть представлены двумя стабильными изотопами, что резко увеличивает число вариантов.

«Изотопно сконструированный материал», синтезированный из чистых изотопов или определенного их набора, будет обладать иными свойствами, нежели те примитивные материалы, которые человек использует сегодня. Например, оказавшись в узле кристаллической решетки, атом иного изотопа, обладая отличной от окружающих атомов массой, будет колебаться с другой частотой. В результате моноизотопный материал имеет совершенно необычный, «когерентный» спектр колебаний атомов, чего невозможно добиться от материала, составленного из разных изотопов. Например, моноизотопный кремний, над получением которого работают во многих лабораториях мира (см. «Химию и жизнь», 2000, № 1), дает возможность преодолеть проблему отвода тепла от мощных микросхем: изотопно-чистые структуры из кремния, а также углерода и других элементов могут обладать гораздо более высокой теплопроводностью, нежели природные вещества. Другой пример — алмаз, составленный из ¹³C: его твердость больше, чем у обычного.

Не исключено, что изотопно-чистые материалы сыграют важнейшую роль в получении новых форм ядерной энергии, создании сверхкоротковолновых источников когерентного излучения, например гамма-лазеров, или разработке материалов с горячей сверхпроводимостью.



С другой стороны, человечество стоит на пороге революции в биологии и медицине. Она будет связана с пониманием того обстоятельства, что существенное различие процессов в живой и неживой природе, на которое указывали Луи Пастер и В.И.Вернадский, проявляется себя и на субатомном уровне. Хотя сейчас нельзя предсказать, какую форму примет эта революция, вполне можно утверждать, что она будет связана с той ролью, которую играют различные изотопы в жизненных процессах. За этим последует принципиальное изменение в масштабах использования изотопов не только в биологии и медицине, но и в сельском хозяйстве. Например, весьма вероятно, что, контролируя изотопный состав питания растений, животных и людей, человечество получит значительные выгоды и в не очень отдаленном будущем на полках магазинов появятся изотопно-обогащенные продукты. (Подробнее об этом см. следующую статью. — *Примеч. ред.*).

Роль изотопов для жизни

Жизнь на Земле неразрывно связана с ядерной энергией. Не говоря о том, что почти все атомы, которые есть в живых организмах, образовались в результате реакций внутри звезд, самим своим существованием биосфера обязана теплу Солнца, а оно есть продукт ядерного синтеза. Однако есть и еще один вид связи — открытое А.Л.Чижевским «живое эхо солнечных бурь», влияние Солнца на биосферу через ничтожные по своей величине магнитные поля. Заметив такую связь на астрофизическом уровне, посмотри, как она проявляется на микроуровне.

После того как изотопы были открыты, предпринималось немало усилий по изучению их роли в жизни организмов. Ранние работы показали, что содержание разных изотопов в живых организмах характерным образом отличается от их соотношения в окружающей среде. Различие это невелико, на уровне одной тысячной, и сопоставимо с изотопным обогащением, которое геологи обнаруживают в минералах. Если не рассматривать изотопы, обладающие сильной радиоактивностью, живые организмы, как кажется на первый взгляд, очень слабо различают изотопы; именно это обстоятельство позволяет с помощью меченных изотопами веществ изучать пути метаболизма. Единственное исключение — дейтерий. Будучи вдвое тяжелее водорода, он обладает иными химическими свойствами. Поэтому, например, млекопитающие, потребляющие только дейтерированную воду, быстро умирают. Что же касается бактерий, то их можно приучить к жизни в тяжелой воде и через некоторое время все атомы водорода в них заменяются на дейтерий.

Следует ли отсюда вывод, что изотопы не играют прямой роли в жизненных процессах? Ни в коем случае. Чтобы увидеть их влияние, надо отказаться от статистического подхода. Ключом служат магнитные свойства ядра, которые

принципиально отличны у разных изотопов. Этим обстоятельством пользуются в таком широко распространенном методе исследования, как ядерный магнитный резонанс.

Сигнал, который изучают в ЯМР-приборе, получается в результате взаимодействия ядер данного вещества с магнитным полем, создаваемым магнитными катушками вокруг образца, и микроволновым импульсом, который возбуждает ядерные колебания. Этот сигнал зависит, с одной стороны, от магнитного момента ядра, а с другой — от так называемого сверхтонкого взаимодействия между ядрами и электронами в их окружении, что связано с квантовым свойством — спином. Спин и магнитный момент данного ядра зависят от его нуклонного состава, поэтому магнитные свойства разных изотопов одного и того же химического элемента могут сильно отличаться.

Было бы странно, если бы столь хорошо организованный механизм не нашел своего места в живых существах. В самом деле, есть данные о чувствительности процессов в живых организмах к постоянному и переменному магнитным полям, есть даже целые области биофизических исследований — магнитобиология и биомагнетизм. Однако до сих пор ясности в этом вопросе нет.

Одна из причин — чрезвычайно низкий уровень магнитных сил, которые обычно связаны с магнитными моментами ядер. Электрические силы, приводящие к химическим реакциям, гораздо сильнее и, как предполагается, не зависят от связанного с изотопами магнетизма. Магнитный момент ядра в тысячу раз слабее, чем тот, что вызван движением электронов. Чтобы получить распознаваемый сигнал от ядра, в ЯМР применяют поля, которые в 20–30 тысяч раз сильнее магнитного поля Земли.

Однако история науки неоднократно доказывала, что слабейший эффект, который никто не замечает, как раз и определяет ход того или иного процесса. Так получается и с влиянием магнитных полей ядер на процессы в живых организмах.

В 2005 году академик А.Л.Бучаченко с коллегами опубликовал в «Proceedings of the National Academy of Sciences» статью, в которой рассказано о проявлении магнито-изотопического эффекта в синтезе АТФ, главного энергоносителя организма. Приведем несколько цитат из этой статьи:

«В одной из своих блестящих статей Вебер и Сениор указывали, что, несмотря на значительный прогресс в нашем знании структуры и нашем понимании молекулярной динамики и функционирования ферментов, которые связаны с синтезом АТФ, химический механизм ее фосфорилирования остается загадочным. «Наше понимание синтеза АТФ на уровне молекул остается рудиментарным», — писали они... Ключевая реакция образования обладающей высокой энергией связи $O-P-O$ остается неясной... В области химии ферментативных реакций все идеи скорее можно рассматривать как предположения... Однако не исключено, что понимание механизма следует из недавно обнаруженного необычного явления: зависимости фосфорилирующей активности ферментов от изотопов магния.