

Круговорот ядерного топлива

О.С. Голованова

Автор: Голованова Оксана Сергеевна, учитель физики, средняя школа №19 г. Калининграда.

Предмет: Физика.

Класс: 9.

Тема: Атомная энергетика.

Профиль: Общеобразовательный.

Уровень: Общий.

Текст задачи. ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГЕТИКА — отрасль энергетики, в которой источником получаемой полезной энергии (электрической, тепловой) является ядерная энергия, преобразуемая в полезную на атомных энергетических установках: атомных электростанциях (АЭС), атомных теплоэлектроцентралях (АТЭЦ) и атомных станциях теплоснабжения (АСТ).

Ядерная энергия освобождается при осуществлении *ядерных цепных реакций* деления некоторых тяжёлых ядер урана, плутония, тория в *ядерных реакторах*. В этом процессе выделяется большое количество тепла — в основном (более 90%) при торможении осколков деления ядер в мате-

риале *ядерного горючего*. Отвод получаемого тепла тем или иным способом и особенно превращение его в полезную энергию являются инженерной задачей, решаемой методами промышленной теплоэнергетики (в частности, для получения электроэнергии используется обычный паротурбинный способ).

Что понимают под «круговоротом ядерного топлива», как добывают уран, как его транспортируют? Рентабельна ли ядерная энергия?

Многие считают, что ядерное топливо, которое использовали на атомной станции, является радиоактивными отходами и хранится на АЭС, нанося большой вред окружающей среде. Так ли это на самом деле? Куда сбрасывают радиоактивные отходы? Как обеспечить безопасное хранение радиоактивных отходов?

а) Выделите ключевые слова для информационного поиска.

б) Найдите необходимую информацию.

в) Обсудите и проанализируйте собранную информацию.

г) Сделайте выводы.

д) Сравните ваши выводы с выводами известных людей.

Возможные информационные источники

Книги:

1. Атомная энергетика / Пер. с нем. С.Б. Гутника. М.: Слово, 1989.
2. Пёрышкин А.В., Гутник Е.М. Физика 9. М.: Дрофа, 1999.

Web-сайты:

- http://www.ronl.ru/yadernaya_fizika
<http://www.uralprom.org/rentabelnost.php>

Культурные образцы

*Атомная энергетика / Пер. с нем.
С.Б. Гутника. М.: Слово, 1989.*

Что понимают под круговоротом ядерного топлива?

На атомных электростанциях должны быть обеспечены не только поставки, но и регулярный вывоз отработанных тепловыделяющих элементов. Из них необходимо извлечь остаток расщепляющего материала, а непригодные к применению и опасные остатки ликвидировать. Он начинается с добычи урана и тория открытым способом или в шахтах. Далее следуют обработка, переработка и изготовление тепловыделяющих элементов и поставка их на атомные электростанции. Затем следует ликвидация отходов.

Как добывают уран?

Уран — тяжёлый металл, добываемый из урановых руд. Самая известная из этих руд — урановая смолка, состоящая на 95% из оксида урана. Она иногда встречается в виде громадных блоков весом в несколько тонн. Добыча становится рентабельной, если руда содержит хотя бы несколько килограммов урана на тонну.

Добытая руда подвергается предварительной обработке: её измельчают и через несколько стадий получают концентрат, содержащий более 70% урана — так называемый «yellow cake», или «жёлтый кекс». И потом его передают на дальнейшую переработку.

Как получают обогащённый уран?

Чистый уран непригоден для использования на атомных электростанциях, так как содержит всего 0,7% расщепляющего U-235, а остальные 99,3% составляет несколько более тяжёлый нерасщепляемый U-238.

Поскольку изотопы урана не различаются по химическим свойствам, то для обогащения приходится использовать разницу в массе. Сначала уран с помощью фтора превращают в газообразный гексафторид урана — происходит соединение урана с фтором. Для разделения изотопов существует несколько способов.

При разделении в фильерах газообразный UF₆ пропускают с высокой скоростью через узкие фильеры дугообразной формы, центробежные силы прижимают более тяжёлые молекулы с U-238 к наружной стенке дуги, что позволяет частично разделить изотопы.

Конечно, полное разделение получить за первую стадию нельзя, поэтому газ пропускают через ряд разделительных ячеек.

Каскадная эффузия. В соответствии с этой технологией газообразный гексафторид урана продавливают через мембраны, причём газ с лёгким изотопом быстрее проходит через поры, чем тяжёлый U-238. Для более полного разделения изотопов устанавливают каскад мембран.

Разделение в газовой центрифуге. Газ вводят в высокоскоростную центрифугу, при вращении которой лёгкие изотопы концентрируются у оси центрифуги, а тяжёлые отбрасываются центробежными силами к её

стенкам и таким образом разделяются. Здесь также необходимо многократное повторение процедуры на последовательно соединённых установках, чтобы достичь требуемой степени обогащения.

Другие способы, которые позволили бы провести обогащение всего в одну стадию, пока находятся лишь на стадии разработки.

Применение. Ядерное топливо используется в ядерных реакторах, где оно обычно располагается в герметично закрытых тепловыделяющих элементах (ТВЭЛ) в виде таблеток размером в несколько сантиметров. К ядерному топливу применяются высокие требования по химической совместимости с оболочками ТВЭЛ, у него должна быть достаточная температура плавления и испарения, хорошая теплопроводность, небольшое увеличение объёма при нейтронном облучении, технологичность производства.

Металлический уран сравнительно редко используют как ядерное топливо. Его максимальная температура ограничена 660°C . При этой температуре происходит фазовый переход, в котором изменяется кристаллическая структура урана. Фазовый переход сопровождается увеличением объёма урана, что может привести к разрушению оболочки ТВЭЛ. При длительном облучении в температурном интервале $200\text{--}500^{\circ}\text{C}$ уран подвержен радиационному росту. Это явление заключается в том, что облучённый урановый стержень удлиняется. Экспериментально наблюдалось увеличение длины уранового стержня в полтора раза.

Использование металлического урана, особенно при температуре

больше 500°C , затруднено из-за его набухания. После деления ядра образуются два осколка деления, суммарный объём которых больше объёма атома урана (плутония). Часть атомов — осколков деления являются атомами газов (криптона, ксенона и др.). Атомы газов накапливаются в порах урана и создают внутреннее давление, которое увеличивается с повышением температуры. За счёт изменения объёма атомов в процессе деления и повышения внутреннего давления газов уран и другие ядерные топлива начинают набухать. Под набуханием понимают относительное изменение объёма ядерного топлива, связанное с делением ядер.

Набухание зависит от выгорания и температуры ТВЭЛ. Количество осколков деления возрастает с увеличением выгорания, а внутреннее давление газа — с увеличением выгорания и температуры. Набухание ядерного топлива может привести к разрушению оболочки. Ядерное топливо менее подвержено набуханию, если оно обладает высокими механическими свойствами. Металлический уран как раз не относится к таким материалам. Поэтому применение металлического урана в качестве ядерного топлива ограничивает выгорание, которое является одной из главных оценок экономики атомной энергетики.

Радиационная стойкость и механические свойства топлива улучшаются после легирования урана, в процессе которого в уран добавляют небольшое количество молибдена, алюминия и других металлов. Легирование добавки снижают число нейтронов деления на один захват ней-

трона ядерным топливом. Поэтому легирующие добавки к урану стремятся выбрать из материалов, слабо поглощающих нейтроны.

К хорошим ядерным топливам относятся некоторые тугоплавкие соединения урана: окислы, карбиды и интерметаллические соединения. Наиболее широкое применение получила керамика — двуокись урана UO_2 . Её температура плавления равна $2800^\circ C$, плотность — $10,2 \text{ т/м}^3$. У двуокиси урана нет фазовых переходов, она менее подвержена распуханию, чем сплавы урана. Это позволяет повысить выгорание до нескольких процентов. Двуокись урана не взаимодействует с цирконием, ниобием, нержавеющей сталью и другими материалами при высоких температурах. Основным недостатком керамики — низкая теплопроводность — $4,5 \text{ кДж/(м}\cdot\text{К)}$, которая ограничивает удельную мощность реактора по температуре плавления. Так, максимальная плотность теплового потока в реакторах ВВЭР на двуокиси урана не превышает $1,4 \cdot 10^3 \text{ кВт/м}^2$, при этом максимальная температура в стержневых ТВЭЛ достигает $2200^\circ C$. Кроме того, горячая керамика очень хрупка и может растрескиваться.

Плутоний относится к низкоплавким металлам. Его температура плавления равна $640^\circ C$. У плутония плохие пластические свойства, поэтому он почти не поддаётся механической обработке. Технология изготовления ТВЭЛ усложняется ещё токсичностью плутония. Для приготовления ядерного топлива обычно идут двуокись плутония, смесь карбидов плутония с карбидами урана, сплавы плутония с металлами.

Высокими теплопроводностью и механическими свойствами обладают дисперсионные топлива, в которых мелкие частицы UO_2 , UC , PuO_2 и других соединений урана и плутония размещают гетерогенно в металлической матрице из алюминия, молибдена, нержавеющей стали и др. Материал матрицы и определяет радиационную стойкость и теплопроводность дисперсионного топлива. Например, дисперсионное топливо Пер состояло из частиц сплава урана с 9 % молибдена, залитых магнием.

Как изготавливают тепловыделяющие элементы?

Как уже было сказано, в топливных стержнях на атомных электростанциях находятся брикеты или окатыши из диоксида урана (UO_2). Диоксид урана получают из обогащённого UF_6 , затем формуют его в брикеты, обычно называемые «таблетками», диаметром 1 см и толщиной 1,5 см. Эти размеры могут меняться от страны к стране, от электростанции к электростанции, но они, как и другие приводимые здесь количественные данные, являются типичными средними величинами. Сырые отпрессованные таблетки нагревают до 1700 градусов для достижения необходимой прочности и плотности, obtачивают до требуемого размера с точностью до $1/10\ 000$ мм и заряжают в оболочку топливного стержня. Оболочку никогда не набивают таблетками полностью, так как при расщеплении иногда образуются газы, требующие определённого пространства. Для улучшения теплопроводности

свободное пространство в оболочке заполняют гелием. Затем заполненные оболочки собирают в пакеты для дальнейших действий.

Что происходит с отработанными тепловыделяющими элементами?

Технология такова: сначала отработанные тепловыделяющие элементы выдерживают в течение года в резервуаре с водой, затем помещают в транспортные контейнеры, обеспечивающие полную радиационную безопасность, и передают в промежуточное хранилище, где они дожидаются дальнейшей переработки.

В некоторых странах, например во Франции и Великобритании, отработанное топливо регенерируют. При этом пригодное к применению топливо извлекают и используют для изготовления новых тепловыделяющих элементов, а опасные продукты радиоактивного распада передают для захоронения на вечные времена в так называемых могильниках.

Не исключено и прямое захоронение отработанных тепловыделяющих элементов в могильниках без предварительной регенерации.

Куда сбрасывают радиоактивные отходы?

Радиоактивные отходы делят на разные уровни опасности.

Слабоактивные отходы в твердой или в жидкой форме подвергают сначала концентрированию до минимального объема путём прессования, выпаривания или сжигания, затем помещают в ёмкость и цементируют.

Среднеактивные отходы, например, измельчённую оболочку топливных стержней, также цементируют в специальных сосудах.

Высокоактивные отходы, в частности, растворённые в азотной кислоте продукты распада, дающие 99% мощности радиоактивного излучения всех ядерных отходов, требуют особой осторожности в обращении. Для этих опасных веществ разработан метод стеклования: растворы высокоактивных веществ концентрируют, подвергают химической обработке, сплавляют при температуре 1150°C со стеклянным порошком, а расплав сливают в толстостенные ёмкости из нержавеющей стали.

Одна регенерационная установка выдаёт на одну тонну урана 130 литров высокоактивных отходов в форме стеклянного блока, пять ёмкостей по 400 литров со среднеактивными и 15 ёмкостей — со слабоактивными отходами. И эти материалы должны быть надёжно захоронены, то есть бессрочно, так как ещё через много поколений они будут представлять реальную опасность.

Как обеспечить безопасное хранение радиоактивных отходов?

Наилучшая возможность безопасного хранения — это захоронение их в подземных соляных пластах.

Ёмкости со слабоактивными отходами устанавливают в соляных штоках и послойно прокладывают солью. После заполнения доверху их замуровывают.

Для захоронения среднеактивных отходов требуется больше мер безопасности: готовят специальную

штольню, в которую категорически запрещается входить даже персоналу, оснащают её телекамерами для контроля и загружают сверху отходами в бетонных резервуарах.

Захоронение высокоактивных отходов происходит так: стеклованные отходы в ёмкостях из нержавеющей стали опускают в скважины глубиной 1000 метров и замуровывают. Месторождения каменной соли особенно удобны для захоронения из-за своей непроницаемости, поскольку соль не даёт радиоактивности проникнуть в окружающую среду, в частности, — в грунтовые воды.

Рентабельна ли ядерная энергия?

Если рассмотреть весь круговорот ядерного топлива, да ещё и побочные расходы, например, затраты на остановку и консервацию старых атомных электростанций, то может возникнуть ощущение, что ядерная энергия обходится слишком дорого. Однако исследование, проведённое Эссенским университетом, показало, что киловатт/час «ядерной электроэнергии» по стоимости равен киловатт/часу энергии из бурого угля, то есть дешевле, чем киловатт/час электричества, полученного из каменного угля. Соотношение это немного изменится, если учесть разный режим рабочего времени на электростанциях, но результаты исследования однозначно показали конкурентоспособность атомных электростанций по сравнению с обычными.

Эти результаты противостоят пессимистическим данным экологических институтов, которые исходят из завышенных затрат на консерва-

цию реакторов и захоронение отходов. По их представлениям, «ядерная электроэнергия» дороже энергии, вырабатываемой из угля, на две трети.

Эти результаты, однако, противоречат экспертным данным независимых институтов. Кроме того, опыт работы по регенерации топлива, захоронению отходов и демонтажу атомных электростанций пока ещё так невелик, что, пожалуй, только историки через несколько столетий смогут определить реальную цену киловатт-часа «ядерной электроэнергии». При этом нужно учитывать, что оценить последствия потенциальных аварий вообще не представляется возможным. Таким образом, путём сравнения мы приходим к выводу, что при сегодняшнем уровне знаний и возможностей цена «ядерной» и «угольной» электроэнергии примерно одинакова.

http://www.ronl.ru/yadernaya_fizika

Ядерная энергия играет исключительную роль в современном мире: ядерное оружие оказывает влияние на политику, оно нависло угрозой над всем, живущим на Земле. А пока человечество стремится утолить свои непрерывно растущие потребности в энергии путём беспредельного развития ядерной энергетики, радиоактивные отходы загрязняют нашу планету. В действительности жизнь на Земле всегда зависела от ядерной энергии: ядерный синтез питает энергией Солнце, радиоактивные процессы в недрах Земли нагревают её жидкое ядро, влияют на подвижность материковых плит.

Первая половина XX века ознаменовалась крупнейшей победой на-

уки — техническим решением задачи использования громадных запасов энергии тяжёлых атомных ядер — урана и тория. Этого вида топлива, сжигаемого в атомных котлах, не так уж много в земной коре. Если всю энергетику земного шара перевести на него, то при современных темпах роста потребления энергии урана и тория хватит лишь на 100–200 лет. За этот же срок исчерпаются запасы угля и нефти.

Вторая половина XX века стала веком термоядерной энергии. В термоядерных реакциях происходит выделение энергии в процессе превращения водорода в гелий. Быстропротекающие термоядерные реакции осуществляются в водородных бомбах.

В термоядерных реакторах, безусловно, будет использоваться не обычный, а тяжёлый водород. В результате использования водорода с атомным весом, отличным от наиболее часто встречающегося в природе, удастся получить ситуацию, при которой литр обычной воды по энергии окажется равноценен примерно 400 литрам нефти. Элементарные расчёты показывают, что дейтерия (разновидность водорода, которая будет использоваться в подобных реакциях) хватит на земле на сотни лет при самом бурном развитии энергетики, в результате чего проблема заботы о топливе отпадёт практически навсегда.

И всё-таки вновь и вновь мы обращаемся к вопросу: из какого материала и какими методами в будущем человечество должно получать энергию? На сегодня существует несколько основных концепций решения проблемы:

1. Расширение сети станций на урановом топливе.

2. Переход к использованию в качестве ядерного топлива тория-232, который в природе более распространён, нежели уран.

3. Переход к атомным реакторам на быстрых нейтронах, которые могли бы обеспечить производство ядерного топлива более чем на 3000 лет, в настоящее время является сложной инженерной проблемой и несёт в себе огромную экологическую опасность, в связи с чем испытывает серьёзное противодействие со стороны мировой экологической общественности и малоперспективно.

4. Освоение термоядерных реакций, во время которых происходит выделение энергии в процессе превращения водорода в гелий.

В настоящее время наиболее разумным представляется развитие энергетики через расширение сети урановых и уран-ториевых атомных станций в период решения проблемы управления термоядерной реакцией.

Однако главная проблема современной энергетики — не истощение минеральных ресурсов, а угрожающая экологическая обстановка: ещё задолго до того, как будут использованы все мыслимые ресурсы, разразится экологическая катастрофа, которая превратит Землю в планету, совершенно не приспособленную для жизни человека.

Методический комментарий

Решая данную задачу, учащиеся должны показать, что, пройдя технологическую цепочку от добычи урана

до извлечения из реактора, ядерное топливо не хранится после этого на АЭС и не является радиоактивными отходами.

а) изучить круговорот ядерного топлива;

б) рассмотреть вопросы использования ядерного топлива на примере Калининской АЭС;

в) показать, что отработавшее ядерное топливо не является радиоактивными отходами.

Показать актуальность: проблема обращения с ядерным топливом волнует население, общественность, экологов.

После того как учащиеся находят информацию, идёт обсуждение различных точек зрения и формирование собственной позиции. Учащиеся, анализируя полученную информацию, формулируют выводы — например, такие:

- На атомных электростанциях должны быть обеспечены не только

поставки, но и регулярный вывоз отработанных тепловыделяющих элементов. Из них необходимо извлечь остаток расщепляющего материала, а непригодные к применению и опасные остатки ликвидировать.

- Ядерное топливо используется в ядерных реакторах, где оно обычно располагается в герметично закрытых тепловыделяющих элементах (ТВЭЛ) в виде таблеток размером в несколько сантиметров.

- Наилучшая возможность безопасного хранения радиоактивных отходов — это захоронение их в подземных соляных пластах.

- При сегодняшнем уровне знаний и возможностей цена «ядерной» и «угольной» электроэнергии примерно одинакова.

Также, анализируя полученную информацию, ученики делают вывод о важности и необходимости знаний, приобретённых в ходе решения задачи.