

С.В. Алексеев, В.А. Зайцев

Нитридное топливо для ядерной энергетики

ТЕХНОСФЕРА
МОСКВА
2013

УДК 621.039.54
ББК 31.4
А 47

А 47 Алексеев С.В., Зайцев В.А.

Нитридное топливо для ядерной энергетики: Москва: Техносфера, 2013. — 240 с. + 8 с. цв. вкл. ISBN 978-5-94836-374-5

В книге приведены сведения о состоянии мирового энергопотребления и роли атомной энергии в энергообеспечении. Кратко рассмотрены сведения о твэлах реакторов на быстрых нейтронах и место нитридного ядерного топлива в разработке реакторов на быстрых нейтронах. Приведены сведения о свойствах, технологии получения и применении перспективного ядерного топлива — нитридов и карбонитридов. Рассмотрены методы получения нитридов и карбонитридов. Проанализированы результаты большого числа работ по монокитриду урана, уран-плутониевым нитридам и карбонитридным композициям.

Книга предназначена для научных работников и инженеров, работающих в области исследования и применения нитридного ядерного топлива.

УДК 621.039.54
ББК 31.4

© 2013, Алексеев С.В., Зайцев В.А.
© 2013, ЗАО «РИЦ «Техносфера», оригинал-макет, оформление
Публикуется в авторской редакции

ISBN 978-5-94836-374-5

Содержание

| | |
|---|-----|
| Предисловие | 5 |
| Предисловие авторов | 7 |
| Основные условные обозначения и сокращения | 9 |
| Введение | 10 |
| Глава 1. ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГЕТИКА И МИРОВОЕ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЕ | 11 |
| 1.1. Современное состояние мировой энергетики | 11 |
| 1.2. Тепловыделяющие элементы ядерных реакторов | 24 |
| Глава 2. МОНОНИТРИД УРАНА | 43 |
| 2.1. Система U—N | 43 |
| 2.2. Получение мононитрида урана | 46 |
| 2.3. Свойства мононитрида урана | 89 |
| 2.3.1. Термодинамические свойства | 89 |
| 2.3.2. Механические свойства | 98 |
| 2.3.3. Химические свойства | 102 |
| 2.3.4. Поведение мононитрида урана под облучением | 105 |
| 2.4. Ядерные свойства мононитрида урана | 110 |
| Глава 3. УРАН-ПЛУТОНИЕВЫЕ НИТРИДЫ | 112 |
| 3.1. Система Pu—N, U—Pu—N | 114 |
| 3.2. Получение нитрида плутония и (U, Pu)N | 115 |
| 3.3. Свойства уран-плутониевых нитридов | 135 |
| 3.3.1. Термодинамические свойства | 135 |
| 3.3.2. Механические свойства | 138 |
| 3.3.3. Химические свойства | 139 |
| 3.3.4. Влияние облучения на свойства (U, Pu)N | 140 |
| Глава 4. КАРБОНИТРИДЫ УРАНА И ПЛУТОНИЯ | 153 |
| 4.1. Системы U—C—N, Pu—C—N, U—Pu—C—N | 153 |
| 4.2. Получение карбонитридов | 158 |
| 4.3. Свойства карбонитридов урана | 168 |
| 4.3.1. Термодинамические свойства | 168 |
| 4.3.2. Механические свойства | 172 |



| | |
|--|------------|
| 4.3.3. Химические свойства | 175 |
| 4.3.4. Поведение карбонитридов под облучением | 179 |
| 4.3.4.1. Карбонитриды урана $U(C, N)$ | 180 |
| 4.3.4.2. Уран-плутониевые карбонитриды $(U, Pu)C, N$ | 184 |
| Глава 5. УРАН-ЦИРКОНИЕВЫЙ КАРБОНИТРИД | 191 |
| 5.1. Система $U-Zr-C-N$ | 193 |
| 5.2. Получение уран-циркониевых карбонитридов | 195 |
| 5.3. Свойства уран-циркониевых карбонитридов | 206 |
| 5.3.1. Термодинамические свойства | 206 |
| 5.3.2. Теплофизические свойства | 209 |
| 5.3.3. Механические свойства | 212 |
| 5.3.4. Химические свойства | 213 |
| 5.4. Радиационная стойкость | 218 |
| 5.5. Поведение уран-циркониевого карбонитрида в условиях аварии ядерного реактора | 221 |
| Заключение | 224 |
| Литература | 228 |

Предисловие

Устойчивое развитие современной цивилизации в существенной степени зависит от энергообеспечения. Энергетика развивается опережающими темпами по сравнению с другими отраслями производства и требует значительных и стабильных источников сырья.

В настоящее время потребности в сырье в основном удовлетворяются за счет углеводородного сырья (нефти, газа и угля). Прогнозы показывают, что эта тенденция сохранится и в ближайшие десятилетия. Однако запасы углеводородов, особенно нефти и газа, достаточно ограничены, к тому же крайне нужны для быстро развивающегося транспорта и нефтехимии.

Разработка основ энергетики будущего, которая позволит исключить или существенно сократить использование углеводородного топлива, включена в число двадцати пяти важнейших научных проблем XXI в.

Альтернативой углеводородному сырью в настоящее время являются возобновляемые источники энергии (гидроэнергия, энергия ветра, биомасса, фотовольтаика, геотермальная энергия, энергия приливов) и ядерная энергетика.

Уже сейчас в структуре первичного энергопотребления ядерная энергия составляет 13,8 %, а в производстве электроэнергии — 17 %. В настоящее время в Европе около половины электроэнергии производится на АЭС и станциях на возобновляемых источниках энергии. Их доля в производстве электроэнергии к 2040 г. увеличится до 65 %. В США наблюдается та же тенденция. Во Франции в 2010 г. в структуре использования энергетических ресурсов для получения электроэнергии ядерное топливо составляло 78 %.

В связи с рядом аварий на атомных электростанциях (The Three Miles Island, Чернобыльская, Фукусима) в настоящее время усилилось негативное отношение общественности к использованию атомной энергии, что привело к приостановке или запрету атомных станций в ряде стран (Швейцария, Германия, Япония и др.). Во многих странах резко возрос интерес к использованию возобновляемых видов энергии для обеспечения возрастающего энергопотребления.

Однако в ноябре 2011 г. Международное энергетическое агентство (МЭА) представило ежегодный доклад, в котором отмечено, что мир не сможет обойтись без ядерной энергетики, чтобы удовлетворить растущие потребности в электроэнергии при сохранении современных климатических условий на планете.

По мнению многих ученых, результаты анализа состояния энергетики в мире подтверждают необходимость сохранения и развития ядерной энергетики, причем не только из-за количества производимой энергии, но с учетом цен и бережного отношения к окружающей среде. Стоимость единицы

возобновляемой энергии сейчас примерно в 3—4 раза дороже по сравнению с атомной.

В настоящее время в качестве основного топлива в ядерной энергетике используется уран-235, запасы которого при крайне неэффективном его использовании невелики и по своему энергетическому потенциалу не намного превышают запасы нефти. Поэтому практически все специалисты-атомщики сходятся во мнении, что основу ядерной энергетики будущего составят быстрые реакторы, работающие в замкнутом цикле, с высоким воспроизводством делящихся элементов.

Разработка реакторов на быстрых нейтронах в нашей стране ведется уже больше полувека, и в настоящее время мы обладаем лучшими результатами в освоении быстрых реакторов с натриевым теплоносителем. Позиция России в области ядерной энергетики в основном ориентирована на создание крупномасштабной ядерной энергетики, которая может быть реализована при разработке реакторов IV поколения на быстрых нейтронах с натриевым, свинцово-висмутовым и свинцовым теплоносителями.

Ядерная энергетика в нашей стране является единственной из отраслей, где мы продолжаем сохранять лидирующие позиции в мире.

Согласно ФЦП «Ядерные технологии нового поколения на период 2010—2015 гг. и на перспективу до 2020 г.» в нашей стране провозглашен курс на создание замкнутого топливного цикла на реакторах с быстрыми нейтронами, в том числе на нитридном ядерном топливе как наиболее перспективном.

Представленная Алексеевым С.В. и Зайцевым В.А. монография «Нитридное топливо для ядерной энергетики» посвящена анализу и обобщению опубликованных и собственных работ авторов, связанных с получением нитридов и карбонитридов делящихся элементов, и перспективам их использования в качестве ядерного топлива для реакторов нового поколения. Это еще один шаг на пути к широкому использованию нитридного топлива в реакторах на быстрых нейтронах, в реакторах-размножителях для обеспечения устойчивого развития ядерной энергетики.

Тарасова Н.П.

член-корр. РАН, профессор, директор
Института химии и проблем устойчивого
развития РХТУ им. Д.И. Менделеева,
зав. кафедрой ЮНЕСКО
«Зеленая химия для устойчивого развития»

Предисловие авторов

Энергообеспечение деятельности человеческого общества вызывает в последнее время значительные трудности. Создание устойчивой энергетики будущего возможно только при использовании воспроизводимых источников энергии или энергии деления ядер U и Pu при их взаимодействии с нейтронами.

Конкурентоспособность ядерной энергетики может быть обеспечена только при использовании реакторов на быстрых нейтронах и замкнутого топливного цикла. Причем реакторы на быстрых нейтронах должны обладать естественной безопасностью и использовать в качестве ядерного топлива высокотемпературные плотные по содержанию делящегося изотопа материалы. К таким материалам относятся нитриды и карбиды урана, плутония и тория. Стратегия развития ядерной энергетики нашей страны предполагает использование реакторов на быстрых нейтронах с плотным нитридным топливом.

Возрастающий интерес к нитриднему топливу, проявляемый в течение последних лет, способствовал накоплению большого количества данных. В нашей стране (г. Обнинск) успешно работал в течение 18 лет первый в мире реактор на быстрых нейтронах БР-10 на урановом мононитридном топливе.

Однако сведения о свойствах нитридного топлива, необходимые научным работникам, инженерам и конструкторам, систематизированы пока недостаточно. Имеющиеся монографии Самсонова Г.В. «Нитриды» (1969), Котельникова Р.Б. «Высокотемпературное ядерное топливо» (1978) и справочные материалы Самсонова Г.В. «Тугоплавкие материалы» (1976), Косолаповой Т.Я. «Свойства, получение и применение тугоплавких соединений» (1986) в недостаточной мере освещают вопросы влияния состава нитридных материалов на их свойства. Мало уделено внимания и методам получения нитридных материалов с низким уровнем загрязнения примесными элементами.

Несмотря на широкое исследование нитридного топлива и большого количества опубликованных работ, нет достаточно полных обзоров и монографий по технологии получения нитридного топлива и исследованию его свойств, особенно с точки зрения влияния на них состава и примесей.

В настоящей работе авторы попытались восполнить этот пробел, собрав воедино и проанализировав данные по опубликованным работам и собственным исследованиям.

В представленной книге рассматриваются вопросы технологии получения мононитридов, нитридных твердых растворов и карбонитридных композиций, их свойства и применение. Авторы надеются, что книга будет

полезна для широкого круга научных работников, инженеров и конструкторов, занимающихся разработкой твэлов для реакторов, использующих нитридное топливо. Предлагаемый обзор не претендует на полный охват всех опубликованных работ.

Авторы заранее благодарны за все замечания по содержанию и форме изложения материалов и надеются, что, несмотря на неизбежные недостатки, книга послужит дальнейшему развитию исследований в области нитридного топлива.

Авторы приносят искреннюю благодарность Ю.С. Борисову, Т.Н. Жарковой, Л.В. Мирошкину и Е.А. Рахмановой за их бескорыстный труд и неоценимый вклад в подготовку рукописи к печати.

Основные условные обозначения и сокращения

| | | |
|------------------|---|---|
| АЭС | — | атомная электростанция |
| АЗ | — | активная зона |
| Твэл | — | тепловыделяющий элемент |
| ТВС | — | тепловыделяющая сборка |
| КПД | — | коэффициент полезного действия |
| БН | — | реактор на быстрых нейтронах |
| ГПД | — | газообразные продукты деления |
| ЯТЦ | — | ядерный топливный цикл |
| ОЯТ | — | отработанное ядерное топливо |
| КВ | — | коэффициент воспроизводства |
| F | — | скорость газового потока, газовыделение |
| R | — | универсальная газовая постоянная |
| α | — | степень превращения, восстановления |
| τ | — | время |
| T | — | температура |
| k | — | константа скорости |
| ПАВ | — | поверхностно-активное вещество |
| ТХЭ | — | трихлорэтилен |
| P | — | давление |
| т. п. | — | теоретическая плотность |
| т. а. | — | тяжелые атомы |
| \tilde{a} | — | параметр кристаллической решетки |
| Π | — | плотность |
| p | — | пористость |
| C_p | — | удельная теплоемкость |
| λ | — | коэффициент теплопроводности |
| a | — | коэффициент линейного расширения |
| E | — | модуль упругости |
| ν | — | коэффициент Пуассона |
| σ | — | напряжение |
| HD | — | твердость |
| $\dot{\epsilon}$ | — | ползучесть |
| S | — | скорость распухания |
| V | — | объем |
| B | — | выгорание |

«Без быстрых реакторов ядерная энергетика может быть лишь эпизодом в развитии энергетики. Разработка же и широкое внедрение этих реакторов позволяют создать ядерную энергетiku любого масштаба».

А.И. Лейпунский

Введение

Стратегия развития ядерной энергетики нашей страны предусматривает применение реакторов на быстрых нейтронах, использующих плотное нитридное уран-плутониевое топливо.

В настоящее время нитридное топливо не имеет широкого применения, но широко исследуется как перспективное высокотемпературное плотное топливо реакторов на быстрых нейтронах и ядерных установок космического назначения.

По сравнению с оксидным и карбидным топливом нитридное топливо имеет наибольшее среди высокотемпературных топливных материалов удельное содержание делящегося изотопа, высокую теплопроводность, совместимо с конструкционными материалами и теплоносителем. Оно более устойчиво в условиях радиационного облучения.

В книге рассматривается нитридное топливо на основе мононитрида урана. Анализируется технология его получения и приводятся данные основных свойств.

Книга состоит из пяти глав. В гл. 1 дан общий обзор состояния мировой энергетики и место в ней ядерной энергетики. Кратко характеризуются твэлы различных реакторов. Показана необходимость развития реакторов на быстрых нейтронах. В гл. 2—5 рассматриваются вопросы получения топлива и приводятся данные о наиболее важных его физических и химических свойствах. Большое внимание уделяется вопросам влияния примесей (кислорода и углерода) на свойства UN и (U, Pu)N и состава карбонитридного топлива U(C, N), (U, Pu)C, N и U, Zr(C, N). Особое значение придается совместимости с конструкционными материалами и теплоносителем, структурным изменениям при выгорании, радиационному распуханию и выделению газообразных продуктов деления.

ГЛАВА 1

ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГЕТИКА И МИРОВОЕ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЕ

Одним из величайших достижений XX столетия явилось овладение ядерной энергией деления атомов урана при взаимодействии их с нейтронами. При делении 1 г изотопов урана или плутония высвобождается примерно 22 500 кВт·ч, что эквивалентно энергии, содержащейся в 2800 кг условного топлива. Такое высокое энерговыделение и определяет огромную теплотворную способность ядерного топлива, превышающую теплотворную способность органического топлива в миллион раз.

Энергообеспечение деятельности человеческого общества вызывает значительные трудности. Увеличение объема потребления энергетических ресурсов ведет к всевозрастающему сокращению потенциальных запасов доступных ресурсов на основе углеводородного топлива. Одновременно с развитием энергопотребления возросло его влияние на окружающую среду. На долю топливно-энергетического комплекса приходится около 55 % загрязнения различными отходами и 70 % теплового загрязнения [1].

Создание устойчивой энергетики будущего, которая позволит исключить или существенно ограничить использование углеводородного топлива, включено в число 25 величайших научных проблем XXI в. [8].

1.1. Современное состояние мировой энергетики

С увеличением степени развития общества происходит неуклонный рост потребления энергии. Развитие промышленного производства, торговли, улучшение жилищных условий — все это требовало дополнительного притока энергии. Без потребления энергетических ресурсов не обходится ни одна сторона жизнедеятельности человека рис. 1.1.

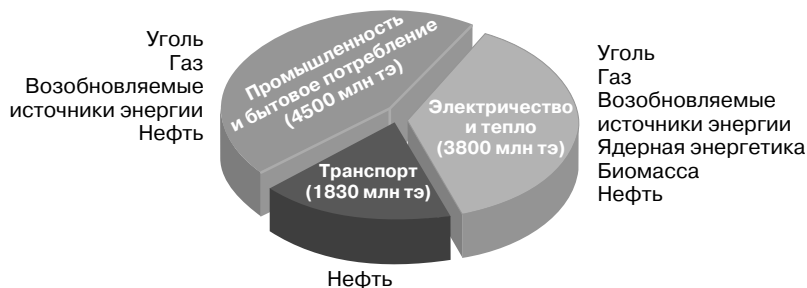
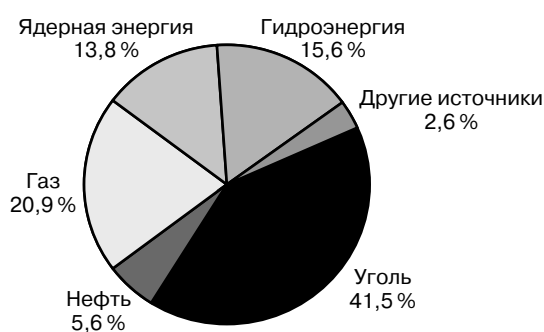


Рис. 1.1. Диаграмма потребления энергетических ресурсов [2] (см. цв. вклейку)

Как писал академик Е.К. Федоров, «в ходе технического прогресса человечество в целом не только никогда не испытывало недостатка в энергетических ресурсах, но всегда находило новые, часто принципиально новые способы получения энергии, задолго до того, когда могли возникнуть ограничения, связанные с истощением известных ресурсов» [42]. Появляются первые ветряные и водяные двигатели. Крупнейшим событием в развитии человечества было изобретение паровой машины. Следующий этап развития цивилизации связан с широким использованием электрической энергии. Открытие явления электромагнитной индукции, создание электродвигателей и электродвигателей значительно расширили возможности использования электрической энергии.

Энергетические ресурсы подразделяются на возобновляемые и невозобновляемые. К невозобновляемым относятся ресурсы, извлекаемые из земли: уголь, нефть, газ, торф, уран и др. К возобновляемым относятся: солнечная энергия, энергия рек, энергия морских приливов и отливов, ветер, геотермальная энергия и так далее.



На рис. 1.2 показана доля различных видов энергии в общем мировом первичном энергобалансе в конце 2007 г.

Рис. 1.2. Структура общего мирового первичного энергобаланса [3] (см. цв. вклейку)

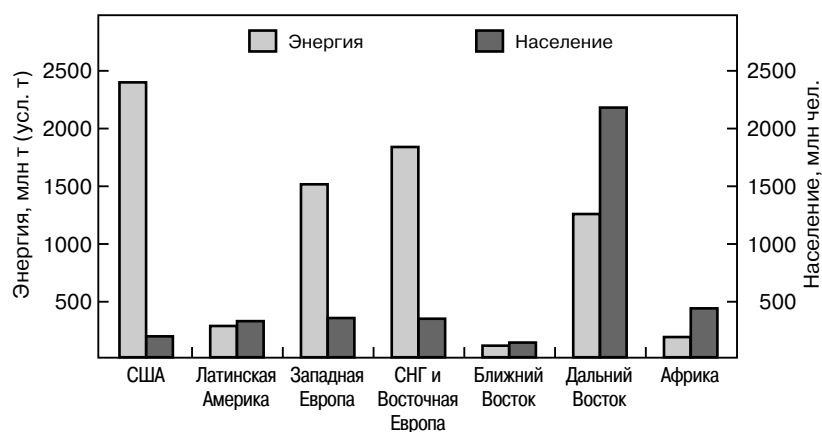


Рис. 1.3. Потребление энергии в различных странах в усл. т [4]

Энергопотребление распределено по странам земного шара крайне неравномерно (рис. 1.3), минимум и максимум энергопотребления на душу населения в настоящее время в мире различается в 50 раз [5].

Практически все известные виды энергоресурсов (уголь, нефть, газ, энергия ветра и воды, солнечная энергия, атомная энергия и др.) могут быть использованы для получения электрической энергии.

Структура мировой потребности в энергии показана на рис. 1.4.

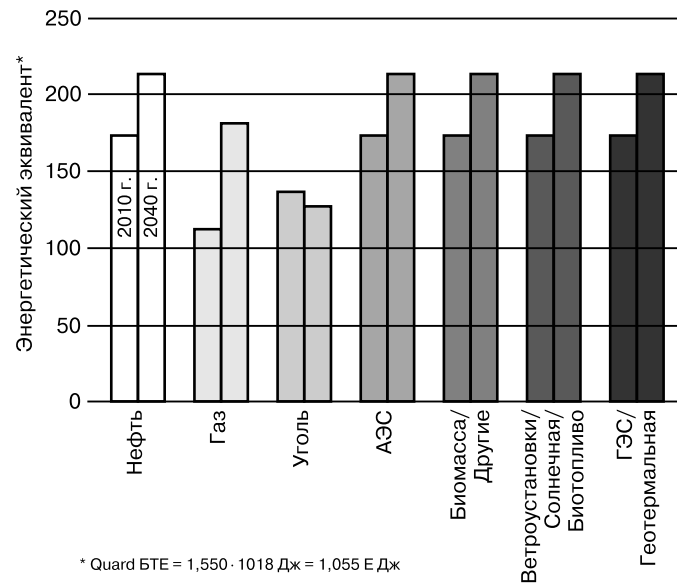


Рис. 1.4. Структура потребности в энергии по типу топлива до 2040 г. [9]

Эффективность производства электроэнергии на различных электростанциях обычно сравнивают по величине коэффициента полезного действия (КПД). Наиболее высокий КПД имеют теплоэлектрические станции (ТЭС), работающие на газе (табл. 1.1).

Таблица 1.1. Значение КПД различных технологий производства электричества [6]

| КПД, % | Уголь | Газ | Нефть | Ядерная энергия | Биомасса | Солнце |
|--------|-------|-----|-------|-----------------|----------|--------|
| 60 | | | | | | |
| 50 | | | | | | |
| 40 | | | | | | |
| 30 | | | | | | |
| 20 | | | | | | |
| 10 | | | | | | |
| 0 | | | | | | |

Прогноз потребления электрической энергии в мире до 2050 г. показан на рис. 1.5, из которого следует, что доля электроэнергии в мире будет только увеличиваться.

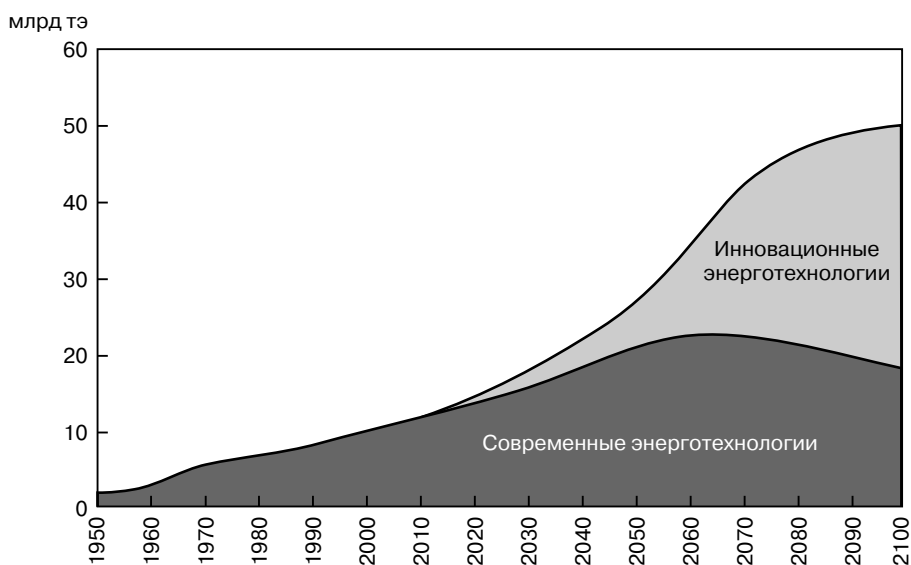


Рис. 1.5. Прогноз динамики энергопотребления в XXI в. [2]

Ископаемое органическое топливо

В настоящее время для получения электроэнергии в основном используются тепловые электростанции, работающие на невозобновляемых энергоресурсах: уголь, газ, нефть и т. д. Общий коэффициент полезного использования энергии на тепловых электростанциях в настоящее время около 40 %. Повысить коэффициент использования органического топлива возможно при создании теплоэлектроцентралей (ТЭЦ). В отличие от обычных тепловых электростанций в задачу ТЭЦ входит снабжение потребителей не только электроэнергией, но и теплом. При этом КПД таких станций может достигать ~70 % [5].

Использование на ТЭС и ТЭЦ угля сопровождается накоплением золы. В золе тепловых электростанций содержится такое количество мышьяка, германия, висмута, бериллия, скандия, кобальта, галлия и урана, которое в десятки и сотни раз превышает их промышленное производство [1]. Основными загрязнителями атмосферы на ТЭС являются оксиды серы и азота, соединения фтора, диоксид углерода и твердые частицы угольной золы и несгоревшего топлива [5]. С выбросом в атмосферу оксидов серы, азота и диоксида углерода связывают развитие таких негативных глобальных экологических явлений, как «кислотные дожди» и «парниковый эффект». Последние 50 лет проблема влияния парниковых газов на окружающую среду приобрела особое значение [7].

На третьей конференции об изменении климата в 1997 г. в Киото (древняя столица Японии) был принят заключительный протокол, который предусматривает общее сокращение выбросов «парниковых» газов в атмосферу на 5,2 %. В соответствии с Киотским протоколом были установлены уровни выбросов «парниковых» газов в атмосферу для всех промышленно развитых государств. За превышение выбросов сверх разрешенных уровней установлены санкции. Неиспользованные квоты выбросов можно продавать.

Особенность Киотского протокола и его значение в том, что он впервые предложил экономические механизмы по обеспечению энергоэффективности и энергосбережения и стимулировал разработку альтернативных методов получения энергии [5]. Уменьшение выбросов «парниковых» газов сокращает выбросы и других, токсичных загрязнителей атмосферы, что, безусловно, идет на пользу людям и сохраняет их здоровье.

В декабре 2009 г. в Копенгагене состоялась 15-я конференция стран-участниц Рамочной конвенции ООН об изменении климата, на которой планировалось выработать новое международное соглашение о сокращении выбросов парниковых газов на посткиотский период (2012—2020 гг.).

Конференция закончилась провалом в связи с непримиримой позицией между развивающимися (Китай, Индия, ЮАР и Бразилия) и развитыми странами (США, Евросоюз, Канада и др.), которые навязывали развивающимся непосильное для них бремя борьбы с выбросами «парниковых» газов, что значительно замедлило бы их экономический рост. Позиция развивающихся стран следующая: поскольку современная ситуация сложилась по вине развитых стран, они и должны брать основное бремя расходов на себя.

К сожалению, в вопросе приоритетного влияния выбросов «парниковых» газов на изменение климата нет единого мнения. По мнению академика Н.П. Лаверова, «лицами, которые выступают с негативными прогнозами (катастрофических последствий глобального потепления от выбросов «парниковых» газов), движут коммерческие и политические интересы».

На конец 2009 г. мировые выбросы CO_2 распределились следующим образом: Китай — 24 %, США — 21 %, ЕС — 12 %, Индия и Россия по 6 % [5].

В настоящее время около 90 % всей потребляемой энергии получают из ископаемого органического топлива. Хотя при этом с дымом уходит 10—15 % тепла, а с охлаждающей водой уносится в окружающую среду более половины тепла, образующегося при сжигании топлива в котле [5], [6]. По наиболее пессимистическим прогнозам, через 40 лет будут исчерпаны мировые запасы нефти, через 70 лет — запасы газа, через 160 лет — запасы угля. По наиболее оптимистическим прогнозам: угля хватит более чем на 1000 лет, газа — на 110—120 лет, нефти — на 100 лет, а скорость их исчерпания пропорциональна растущему потреблению энергии [8].

Гидроэнергетика

Использование кинетической энергии воды началось в XIX в. и получило наибольшее развитие среди всех возобновляемых источников энергии. В 2005 г. на гидроэлектростанциях (ГЭС) было выработано около 17 % электроэнергии в мире. Всего в мире эксплуатируется около 45 тысяч гидро-

электростанций. КПД гидроэлектростанций достигает 85—90 %. Стоимость электроэнергии, вырабатываемой ГЭС, как правило, в 6—8 раз меньше, чем ТЭС. Однако выработка электроэнергии на ГЭС подвержена сильным колебаниям, особенно в засушливые годы. Основными недостатками, ограничивающими строительство ГЭС, являются экологические и социальные проблемы, вызываемые затоплением огромных территорий, а также географическая удаленность районов производства гидроэнергии от центров ее потребления.

Энергия ветра

Энергия воздушного потока пропорциональна скорости его движения в третьей степени, однако лишь часть этой энергии может быть преобразована в электрическую. Теоретически возможный КПД использования ветровой энергии равен 59,3 %. На практике из-за значительной неравномерности ветра и дополнительных потерь, связанных с несовершенством конструкций ветроагрегатов, их среднегодовой КПД не превышает 30 %. Использование кинетической энергии воздушных масс особенно интенсивно осваивалось в последние 20 лет в Китае, Европе и США. В 2009 г. общая установленная мощность ветрогенераторов составила 159,2 ГВт, что составило 2 % всей произведенной электрической энергии.

Ветровая энергетика отличается низкой плотностью энергии. Для ее производства требуются огромные площади поверхности. К недостаткам этого вида энергетика также следует отнести ее нестабильность, шумовое и вибрационное загрязнение, опасность для дикой природы.

Солнечная энергетика

Солнце является мощным источником электромагнитного излучения. Если солнечную энергию, поступающую на землю, перевести в условное топливо, то оно составило бы 100 трлн тн. э. за год [8]. На нашей планете всего запасено 6 трлн т различных углеводородов. Содержащуюся в них энергию Солнце отдает Земле всего за 3 недели.

Существует три пути использования солнечной энергии:

- преобразование солнечной энергии в электрическую;
- получение тепловой энергии;
- производство биомассы, концентрирование солнечной энергии автотрофными организмами и последующее использование их химической энергии.

Первые солнечные батареи были представлены на Всемирной выставке в Париже в конце XIX в. В 1953 г. в США была разработана солнечная батарея, непосредственно преобразующая энергию Солнца в электрическую. Первая промышленная солнечная электрическая станция мощностью 5 МВт была построена в 1985 г. в Крыму.

Несмотря на серьезные трудности, связанные с необходимостью предварительного концентрирования солнечной энергии (потенциальная плотность солнечной энергии 150—200 Вт/м²) во всем мире интенсивно разрабатываются солнечные электрические станции (СЭС) различной мощности.

Кроме использования солнечной энергии для получения электроэнергии она находит широкое применение в получении тепловой энергии. Энер-

гетические установки преобразования солнечной энергии в тепло могут быть активными и пассивными. В пассивных системах солнечного энергоснабжения теплота передается с помощью радиации, теплопроводности или естественной конвекции. Такие системы могут использоваться как средство отопления помещений.

К активным системам преобразования солнечной энергии в тепловую относятся системы с принудительной циркуляцией теплоносителя, контактирующего с поверхностью, нагретой солнечным излучением. Аппараты, в которых происходят процессы активного теплообмена, называются коллекторами. Коллекторы широко используются в качестве отопительных установок, опреснителей воды, бытовых водонагревателей и для сушки сельскохозяйственных продуктов.

Одно из важнейших направлений использования солнечной энергии связано с живыми растительными организмами. Автотрофные организмы ежегодно ассимилируют в результате процесса фотосинтеза около 200 млрд т углерода, превращая его в органические соединения [5]. Общее энергосодержание образующейся при этом биомассы оценивается в $3 \cdot 10^{21}$ Дж. Доля растительной биомассы в мировом потреблении энергии пока сравнительно невелика и составляет примерно 8 % от общего количества топлива, расходуемого в мире.

По оценкам ряда экспертов [8], использование биотоплива приведет к увеличению выбросов в атмосферу углекислого газа. Кроме того, будут отчуждены огромные площади пахотной земли, лесов, пастбищ и водно-болотных территорий.

Приливная гидроэнергетика

Приливные электростанции (ПЭС) используют энергию приливов и отливов, фактически — кинетическую энергию вращения Земли. Изменение уровня воды вследствие влияния гравитационных сил Луны и Солнца в течение суток происходит дважды. Критическим значением перепада высот прилива и отлива, при котором строительство приливных электростанций экономически и технически обоснованно, считается 5 м.

Первая в мире ПЭС была построена в 1966 г. во Франции в устье реки Ранс, впадающей в Ла-Манш. Коэффициент использования французской ПЭС составляет около 25 %. Суммарный потенциал ПЭС в Европе — 12 ГВт.

В РФ построена единственная, Кислогубская, ПЭС, которая в 2009 г. была модифицирована и ее мощность доведена до 1,7 МВт. По оценкам специалистов, за счет использования энергии приливов в России можно получать ежегодно около 270 млрд кВт·ч.

Приливные электростанции экологически не безопасны, так как нарушают нормальный обмен соленой и пресной воды, влияют на климат, меняя энергетический потенциал морских вод, их скорость и территорию перемещения.

Геотермальная энергетика

Геотермальная энергетика базируется в основном на тепловой энергии вулканических источников, используется в 62 странах мира. Ведущее место

по геотермальным ТЭС занимают США, на которые приходится более 40 % действующих в мире мощностей.

В столице Исландии (Рейкьявик) все теплоснабжение обеспечивается за счет геотермальной энергетики.

Суммарная мощность геотермальных станций около 11 000 МВт, а суммарный вклад геотермальных источников в энергогенерацию мира — около 0,4 %. Запасы геотермальной энергии — более 200 ГВт.

В РФ разведано около 60 месторождений термальных вод с дебитом более 300 тыс. м³/сут. Наибольшими геотермальными ресурсами обладает Камчатка. Сейчас там работают три геотермальные ТЭС. Они могут обеспечить более 20 % потребностей региона в электрической энергии. Стоимость энергии геотермальной ТЭС довольно высока и колеблется от 2 до 6 тыс. долл. за 1 кВт.

Ядерная энергетика

Развитие современной экономики основывается на опережающем развитии энергетики. Эта тенденция сохраняется независимо от состояния первичных энергетических ресурсов. В связи с этим мировому сообществу нужно решить проблему активно растущего мирового энергопотребления. Казалось бы, эту проблему можно решить за счет увеличения добычи нефти и газа, так как сейчас в мировой структуре энергопотребления углеводороды занимают ведущее место. Однако, все чаще возможности нефти рассматриваются как уже достигшие либо приближающиеся к уровню максимальной годовой добычи. Такая же перспектива ожидает природный газ, но несколько позже. Не стоит забывать, что беспокойство относительно выбросов загрязняющих атмосферу оксидов серы, азота, соединений фтора, диоксида углерода и других соединений, способствующих образованию такого глобального явления, как «парниковый» эффект, требует сокращения использования углеводородных источников энергии.

Выход возможен при быстром развитии возобновляемых источников энергии за счет использования энергии Солнца, ветра, гидроресурсов, энергии приливов и биомассы. Возобновляемые виды энергии могут быть использованы в промышленности, в производстве тепла и т. д. (рис. 1.6).

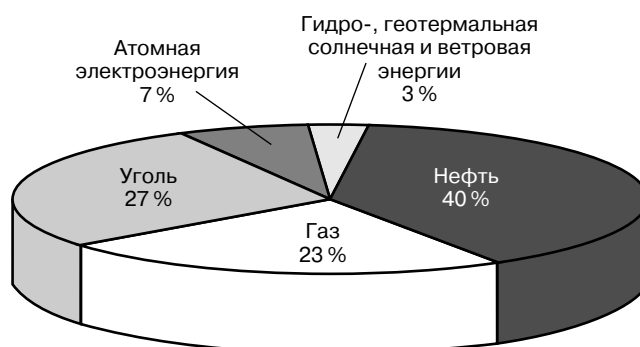


Рис. 1.6. Диаграмма потребления энергетических ресурсов в мире [7]

Быстрое развитие технологии возобновляемых источников энергии требует значительных капиталовложений, что затрудняет достижение требуемых темпов развития. Переход от традиционных источников к возобновляемым и сейчас является одним из приоритетных направлений во многих странах.

По данным [10], в области электроэнергетики половина новых мощностей, вводимых в действие в мире до 2035 г. для удовлетворения растущего спроса, будет приходиться на возобновляемые источники энергии, главным образом — гидро- и ветроэнергетику. Однако, следует иметь в виду нестабильность возобновляемых источников энергии. По данным [9], в настоящее время в качестве энергетической альтернативы может быть предложена только ядерная энергетика. Все другие энергоисточники, которые могут быть привлечены к решению глобальной энергетической проблемы, непригодны и по масштабному фактору, и по экономическим ограничениям. Стоимость возобновляемой энергетики (солнечная, ветровая и т. д.) сейчас примерно в 3—4 раза дороже по сравнению с существующей атомной энергетикой. В ноябре 2011 г. Международное энергетическое агентство представило годовой доклад, в котором отмечено, что мир не сможет обойтись без ядерной энергетики [9].

С точки зрения масштабов энергопотребления и необходимости снижения выбросов «парниковых» газов, ограниченности запасов углеродных энергетических ресурсов и необходимости перехода на безуглеродную энергетику использование атомной энергетики не вызывает сомнения.

Уже в настоящее время действующие российские атомные электростанции ежегодно предотвращают выброс в атмосферу примерно 210 млн т CO_2 , а в целом атомные станции мира позволяют предотвратить выброс до 3,4 млрд т углекислого газа, который считается основным фактором глобального потепления. Внешний вид АЭС показан на рис. 1.7.



Рис. 1.7. Внешний вид Ровенской АЭС (Украина) (см. цв. вклейку)

В промышленно развитых странах (США, Франция, Бельгия и др.) атомная энергетика давно стала одним из важнейших источников энергообеспечения. Все большее количество стран, развитых и развивающихся, приходит к необходимости освоения на своей территории технологий мирного использования атомной энергии. В настоящее время, по данным МАГАТЭ, коммерческую ядерную энергетику имеют около 30 стран, свыше 60 новых стран выражают большой интерес к ядерной энергетике.



Рис. 1.8. Доля атомной энергетика в суммарном производстве электроэнергии в различных странах мира (%) [14]

Согласно статистическим данным Всемирного ядерного агентства (World Nuclear Agency — WNA) по состоянию на 1 апреля 2011 г. во всем мире было 438 действующих энергетических реакторов суммарной установленной мощностью 374 127 МВт (эл.), что составляло примерно 8 % всех мировых электрогенерирующих мощностей [11]. В мире доля ядерной энергетик-

ки достигла 14 % общего объема вырабатываемой электроэнергии. Перешагнули порог 50 % доли атомной электроэнергетики в общей выработке электричества Франция, Словакия и Бельгия (рис. 1.8).

Из 13 стран, где доля ядерной электроэнергетики превысила 1/3, кроме Южной Кореи, все находятся в Европе. Из приведенных данных (см. рис. 1.8) видно, что мировая ядерная энергетика находится в странах и регионах с высоким спросом на электроэнергию, развитой экономикой, высоким уровнем технологического развития и небольшими запасами нефти.

Интерес к ядерной энергетике вызван еще и тем, что она может обеспечить потребителя необходимыми видами энергии: электричеством, теплом, энергоносителями, в том числе водородом. Внедрение атомной энергетики в неэлектрические сферы потребления энергетических ресурсов позволяет использовать энергию мирного атома в промышленности, на транспорте, в коммунальном секторе [12]. Важно и то обстоятельство, что атомная энергетика доступна для всех, в том числе и в малодоступных регионах мира, и технически подготовлена для масштабного развития. Этот вид энергии экологически чистый. Основное использование энергии деления атомов в настоящее время осуществляется в реакторах на тепловых нейтронах, которые еще в 40-х гг. прошлого века были освоены для производства оружейных материалов — плутония и трития. Основой современной ядерной энергетике в мире являются так называемые легководные реакторы (LWR). Легководные реакторы (LWR) применяются более чем в 80 % эксплуатируемых в мире АЭС, использующих открытый топливный цикл [13].

В настоящее время в качестве основного топлива в ядерной энергетике является уран-235, запасы которого при крайне неэффективном его использовании невелики. Необходимо иметь в виду, что в естественном уране содержание U-235 не превышает 0,714 % масс. Глобальные запасы урана в земной коре оцениваются в $\sim 10^{14}$ т, однако добыча урана в настоящее время экономически выгодна только в тех местах, где концентрация урана в руде более 0,1 % [6]. Основным фактором, ограничивающим масштабное развитие ядерной энергетике, является ограниченность доступных запасов урана-235. По своему энергетическому потенциалу его запасы не намного превышают запасы нефти [8].

Сейчас в эксплуатации находится 359 реакторов типа LWR: 271 реактор с водой под давлением (PWR), включая российские реакторы ВВЭР, и 88 реакторов с кипящей водой (BWR). Ядерная энергетика с реакторами на тепловых нейтронах, осваивающая не более 1,5 % природного урана, в принципе не может обеспечить создание крупной мировой энергетике (табл. 1.2).

Выход из этого положения можно найти на пути использования АЭС с реакторами-размножителями. С их внедрением эффективное использование природного урана может достигнуть 30—40 %. Широкое применение АЭС с реакторами-размножителями может решить проблему развития энергетике с точки зрения обеспеченности энергоресурсами в течение многих столетий без каких-то топливных ограничений.

Реализация возможностей ядерной энергии, по данным работы [1], достижима лишь на основе освоения замкнутого ядерного топливного цикла (ЯТЦ), с вводом реакторов, обеспечивающих простое или расширенное воспроизводство ядерного топлива. Реакторы на быстрых нейтронах позво-

ляют не просто «сжигать» природный уран-235, а вырабатывать при этом новое топливо [12]. В этом случае атомная энергетика обладает практически неограниченными ресурсами топлива. Ядерные реакторы на быстрых нейтронах способны воспроизводить новое топливо из U-238 или Th-232, запасы которых во много раз превышают ресурс U-235, используемого в настоящее время в легководных атомных реакторах.

Таблица 1.2. Мировые ресурсы ядерной энергии [4]

| Принцип производства энергии | Вид ресурса | Ресурсы в энергетическом эквиваленте Q |
|--------------------------------|--|--|
| Реакторы на тепловых нейтронах | Уран при затратах на извлечение до 130 долл./кг | 40 |
| Реакторы-размножители | Уран при затратах на извлечение: | |
| | до 130 долл./кг | 1000 |
| | до 295 долл./кг | 2500 |
| | в океане | 340 000 |
| | в земной коре на глубине до 500 м | 670 000 |
| Термоядерные реакторы | Литий (как источник трития) при затратах на извлечение до 60 долл./кг: | |
| | природный литий | 1900 |
| | литий в океане | 2 750 000 |
| | дейтерий в океане | 4 000 000 000 |

Примечание. Q — специально введенная единица, позволяющая сравнивать энергетические возможности различных видов источников энергии — $Q = 3,35 \cdot 10^{10}$ кВт · ч в год (тепловой энергии).

Замыкание топливного цикла и разработка быстрых реакторов с расширенным воспроизводством топлива, по мнению большинства специалистов, может рассматриваться в качестве ключевого направления инновационного развития атомной энергетике [1], [8], [12].

При многих преимуществах мирного атома есть очевидные недостатки. Это потенциальная опасность для людей и окружающей среды и огромные капиталы на строительство. Аварии на Three Miles Island (США), Чернобыльской АЭС (СССР), Фукусима (Япония) получили широкое международное отражение в средствах массовой информации. Авария 11 марта 2011 г. на Японской АЭС «Фукусима-2» изменила отношение к ядерной энергетике во многих странах. В ряде стран Европы наблюдается рост антиядерных настроений. Германия ввела мораторий на продление сроков действующих АЭС. В европейских странах с богатой экономикой и с развитым рынком электроэнергии, а именно в Австрии, Германии Бельгии, Италии, Швейцарии в настоящее время не рассматривают возможность строительства новых реакторов. В Японии с 2012 г. из 54 ядерных реакторов работают лишь четыре. Для других АЭС местные власти не дают разрешения на дальнейшую эксплуатацию. Страхи, порожденные риском облучения, в широких

слоях общественности могут задержать любые планы нового ядерного строительства.

Отношение ряда стран к использованию ядерной энергетики характеризуют данные табл. 1.3.

Таблица 1.3. **Отношение к использованию ядерной энергетики**

| Страна | Выработка электроэнергии на АЭС, % к общей выработке (2010 г.) | Планы по отношению к ядерной энергетике |
|------------|--|--|
| Япония | 28,9 | В 2013 г. работают 4 реактора из 54. К 2030 г. в стране не должно остаться ни одного действующего реактора |
| Германия | 26,1 | К концу 2011 г. в эксплуатации находилось 9 реакторов из 17. Принято решение к 2022 г. остановить все реакторы |
| Швейцария | 39,5 | В соответствии с решением правительства к 2034 г. все реакторы выводятся из эксплуатации |
| Бельгия | 51,7 | Планируется начать свертывание ядерной энергетики в 2015 г., которое должно завершиться в 2025 г. |
| Нидерланды | 3,7 | Строительство энергоблока № 2 АЭС «Барселе» отложено |
| Италия | | Отказалась от намерения возвратиться к ядерной энергетике |

США занимает первое место в мире по числу работающих реакторов — 104 блока. Ядерная энергетика обеспечивает около 20 % общего производства электроэнергии в стране. По прогнозам экспертов, структура топливного баланса электроэнергетики США до 2035 г. заметно не изменится.

Во Франции эксплуатируется 58 реакторов PWR, которые обеспечили в 2010 г. 75,2 % производства электроэнергии в стране. Франция не отказывается от программы развития ядерной энергетики. Великобритания и Испания также не отказываются от использования ядерной энергии в энергообеспечении страны.

Китай (эксплуатируется 16 реакторов) и Индия (более 20 реакторов) сохраняют программу строительства атомных электростанций в прежнем объеме [14]. Индия планирует к 2050 г. довести выработку электроэнергии на АЭС до 25 % [9].

Большинство стран, развивающих атомную энергетику (Финляндия, Словакия, Тайвань, Южная Корея, Бразилия, Аргентина, в том числе РФ) подтвердили планы на строительство новых энергоблоков. Такие страны, как Турция, Вьетнам, Бангладеш также не отказываются от планов сооружения АЭС [8]. По оценке МАГАТЭ, минимальный рост ядерной энергетики в мире составит 25 % к 2035 г., максимальный — приведет к удвоению мощностей АЭС [9]. Наибольший рост будет в Дальневосточном регионе.

События в Японии показали, что даже очень маловероятные события (цунами, землетрясения) могут вызвать аварии на АЭС. Разрабатываемые новые конструкции реакторов содержат активные и пассивные системы безопасности, способные противостоять даже самым серьезным стихийным бедствиям [15]. Новые АЭС должны быть спроектированы и сооружены так, чтобы за 50—60 лет эксплуатации на них были исключены тяжелые аварии. Для ядерной и радиационной безопасности реакторным установкам необходима внутренняя самозащищенность, которая должна стать главным критерием при выборе перспективных конструкций ядерных реакторов [16].

Позиция России, сформулированная в Постановлениях Правительства (ФЦП) [17]—[19] заключается в стратегическом ориентировании на замкнутый топливный цикл, который включает разработку проектов быстрых реакторов с использованием в качестве теплоносителя натрия и свинца. Разрабатываются технологии топливного цикла, предусматривающие использование нитридного топлива и технологии уран-ториевого цикла. Программы ФЦП рассчитаны на период до 2025 г. и предусматривают целый комплекс проектов по замыканию ядерного топливного цикла. В целом в России предусмотрено за 12 лет построить 26 крупных атомных блоков.

Согласно [20] установленная электрическая мощность АЭС в мире должна возрасти с 370 ГВт в 2009 г. до 2000 ГВт к 2050 г., то есть мощности АЭС должны возрасти в 5—6 раз по сравнению с нынешним [12]. По состоянию на 1 апреля 2010 г. во всем мире строились 52 ядерных реактора, 144 реактора находились в стадии проектирования; рассматривались также предложения по строительству еще 344 реакторов [14].

Согласно данным работы [8] атомная энергия, особенно при условии эффективного замыкания ядерного топливного цикла, в общей энергетической стратегии объективно представляет собой не альтернативу углеродной или возобновляемой энергетике, а является практически единственным гарантом обеспечения энергетической безопасности государств мира на долгую перспективу.

Практически все специалисты-атомщики сходятся во мнении, что основу ядерной энергетики будущего составят быстрые реакторы, работающие в замкнутом цикле с высоким воспроизводством делящихся элементов.

На начальном этапе в странах, развивающих реакторы на быстрых нейтронах (Франция, США, Индия, Россия) планируется использовать оксидное (U, Pu)O₂-МОХ топливо. Дальнейшее усовершенствование связывается с высокоплотным топливом: карбидным, нитридным или металлическим [21].

При этом надо решать задачу обеспечения безопасности во всех звеньях (на всех этапах) жизненного цикла: от добычи урана и до изоляции радиоактивных отходов [12].

1.2. Тепловыделяющие элементы ядерных реакторов

Овладение энергией мирного атома стало возможно после создания ядерного реактора, устройства, в котором обеспечиваются условия самоподдерживающейся цепной реакции деления изотопов урана или плутония с участи-