

В.А. Зайцев, П.А. Зайцев

# Ядерное топливо с покрытием

ТЕХНОСФЕРА  
МОСКВА  
2018

**УДК 621.039.54**

**ББК 31.4**

**З-17**

**З-17 Зайцев В.А., Зайцев П.А.**

**Ядерное топливо с покрытием**

**Москва: ТЕХНОСФЕРА, 2018. – 240 с. ISBN 978-5-94836-501-5**

В книге приведены сведения о состоянии энергопотребления и роли атомной энергии в энергообеспечении. Кратко рассмотрены преимущества применения делящихся материалов с покрытием в различных разрабатываемых и существующих реакторных системах.

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

**УДК 621.039.54**

**ББК 31.4**

© 2018, Зайцев В.А., Зайцев П.А.

© 2018, АО «РИЦ «ТЕХНОСФЕРА», оригинал-макет, оформление

**ISBN 978-5-94836-501-5**

# Содержание

<b>Предисловие</b> .....	<b>5</b>
<b>Предисловие авторов</b> .....	<b>7</b>
<b>Основные условные обозначения и сокращения</b> .....	<b>9</b>
<b>Введение</b> .....	<b>10</b>
<b>Глава 1. Мировое энергопотребление и ядерная энергетика</b> .....	<b>11</b>
1.1. Современное состояние мировой энергетики.....	11
1.2. Ядерная энергетика.....	15
1.3. Реакторы атомных электростанций.....	20
1.4. Реакторы поколения IV.....	24
1.5. Ядерное топливо высокотемпературных газоохлаждаемых реакторов.....	30
1.6. Ядерное топливо исследовательских реакторов.....	33
<b>Глава 2. Свойства делящихся материалов ядерного топлива</b> .....	<b>37</b>
2.1. Уран-молибденовые сплавы.....	38
2.2. Оксидное ядерное топливо.....	43
2.2.1. Диоксид урана.....	43
2.2.2. Диоксид тория.....	48
2.2.3. Система ThO <sub>2</sub> -UO <sub>2</sub> .....	53
2.3. Карбидное ядерное топливо.....	62
2.3.1. Карбиды урана, тория и плутония.....	63
2.3.2. Дикарбид тория.....	68
2.3.3. Карбиды плутония.....	70
2.3.4. Система Th-U-C.....	72
2.3.5. Система U-Pu-C.....	77
2.4. Нитридное топливо.....	81
2.4.1. Мононитрид урана.....	81
2.4.2. Уран-циркониевый карбонитрид.....	85
<b>Глава 3. Получение гранулированных частиц</b> .....	<b>99</b>
3.1. Получение сферических частиц методом порошковой металлургии.....	101
3.2. Получение сферических частиц методом золь-гель.....	104
3.3. Другие методы получения сферических частиц.....	121

<b>Глава 4. Нанесение покрытий на частицы делящихся материалов</b> .....	<b>123</b>
4.1. Нанесение покрытий методом порошковой металлургии.....	124
4.2. Нанесение покрытий методом металлизации.....	124
4.3. Нанесение покрытий на сплавы U-Mo.....	125
4.4. Нанесение покрытий химическим осаждением из газовой фазы.....	126
4.4.1. Получение металлических покрытий.....	127
4.4.2. Нанесение керамических покрытий.....	128
4.4.3. Нанесение покрытий на топливные частицы газоохлаждаемых реакторов.....	130
4.5. Нанесение покрытий методом импульсного лазерного напыления.....	144
<b>Глава 5. Разработка ядерного топлива с покрытием</b> .....	<b>146</b>
5.1. Высокоплотное ядерное топливо исследовательских и материаловедческих реакторов.....	146
5.2. Альтернативное топливо реакторов поколения IV.....	155
5.2.1. Альтернативное ядерное топливо для реактора SCWR.....	156
5.2.2. Альтернативное ядерное топливо реактора GFR.....	166
5.2.3. Ядерное топливо для реактора VHTR.....	173
<b>Глава 6. Перспективы использования ядерного топлива с покрытием</b> .....	<b>190</b>
6.1. Топливо исследовательских реакторов.....	190
6.2. Топливо для легководных реакторов.....	193
6.3. Топливо реактора MSR.....	203
<b>Заключение</b> .....	<b>210</b>
<b>Литература</b> .....	<b>214</b>

## Предисловие

Устойчивое развитие современной цивилизации в значительной степени зависит от надежной энергетики, которая развивается опережающими темпами по сравнению с другими отраслями и требует различных и стабильных источников сырья вместо истощающегося углеводородного.

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.

Альтернативными углеводородному сырью в настоящее время являются возобновляемые источники энергии: гидроэнергетика, энергия ветра, биомасса, фотовольтаика, термальная энергия, энергия приливов и ядерная энергетика, а в перспективе — термоядерная.

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 (Швеция, Германия, Япония и др.). Во многих странах резко возрос интерес к использованию возобновляемых видов энергии для обеспечения возрастающего энергопотребления.

Чернобыль и Фукусима серьезно подорвали доверие к ядерной энергетике. Однако в ежегодном докладе Международного энергетического агентства (МЭА) в 2011 году было подчеркнуто, что в плане удовлетворения растущих потребностей в электроэнергии человечество не сможет обойтись без ядерной энергетике в связи с ее практически неограниченными ресурсами, а также экономическими и экологическими преимуществами перед традиционными источниками энергии.

По мнению многих ученых, результаты анализа состояния энергетики в мире подтверждают необходимость сохранения и развития ядерной энергетике, причем не только из-за количества производимой энергии, но и из-за учета цен и бережного отношения к окружающей среде. Стоимость единицы возобновляемой энергии сейчас примерно в 3–4 раза выше по сравнению с атомной.

Несмотря на то что при строительстве АЭС начальные капиталовложения достаточно велики, себестоимость выработки 1 МВт·ч электричества более низка, чем при использовании органического топлива, особенно в связи с налогом на выброс вредных веществ.

Вместе с тем эксплуатация ядерных реакторов выявила ряд проблем. Слабым местом современных ядерно-энергетических технологий является ограниченное использование энергетического потенциала уранового топлива. С этой проблемой тесно связан вопрос о дальнейшей судьбе облученного топлива после его выгрузки из реактора. Наличие отработанного ядерного топлива вызывает

необходимость решать задачу переработки и окончательного безопасного захоронения отходов.

В настоящее время атомная энергия рассматривается как самая жизнеспособная для производства электричества, по крайней мере в ближайшие 50–100 лет. Однако все существующие и строящиеся ядерные энергоблоки недостаточно конкурентоспособны по сравнению с современными тепловыми электростанциями с точки зрения теплового коэффициента полезного действия.

Группа стран (Канада, страны Европейского Союза, Япония, Россия, США и др.) в 2000 г. инициировала международное сотрудничество в области разработки реакторов следующего поколения. На Международном форуме (Generation IV International Forum — GIF, 2001) была принята программа, направленная на разработку реакторов поколения IV.

Разработка реакторов поколения IV должна решить ряд важных вопросов развития ядерной энергетики, таких как: оптимальное использование ядерного топлива, надежное энергоснабжение, конкурентоспособность ядерной энергетики, безопасность и надежность АЭС, обеспечение гарантии нераспространения делящихся материалов. Конечная цель разработки таких реакторов — увеличение теплового КПД до 45–50 % и выше.

Для достижения поставленных задач по программе GIF значительное внимание уделяется разработке и исследованию ключевых характеристик ядерного топлива и конструкционных материалов. В связи с низкой теплопроводностью оксидного топлива проводятся исследования альтернативного топлива с использованием высокотеплопроводных и ураноемких соединений делящихся материалов с покрытием, которое успешно было использовано при разработке топлива HTGR.

Такой вид топлива предлагается использовать не только во вновь разрабатываемых реакторах GIF, VHTR, SCWR, MSP, но и в исследовательских реакторах, реакторах LWR.

Представленная В.А. Зайцевым и П.А. Зайцевым монография «Ядерное топливо с покрытием» посвящена анализу и обобщению опубликованных и собственных работ авторов, связанных с получением ураноемких и высокотеплопроводных делящихся материалов с покрытиями из SiC, ZrC, ZrN и т.д., и перспективам их использования в качестве ядерного топлива для действующих и разрабатываемых реакторных установок. Это еще один шаг в разработке безопасных высокоэффективных реакторов для обеспечения устойчивого развития ядерной энергетики.

**Н. П. Тарасова**

*Президент Международного союза  
теоретической и прикладной химии (IUPAC),  
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

Аварии на АЭС в Чернобыле и Фукусиме серьезно подорвали доверие к ядерной энергетике. Тем не менее в ежегодном докладе Международного энергетического агентства (МЭА) в 2011 году было подчеркнуто, что мир в настоящее время не может обойтись без ядерной энергетике в связи с ее практически неограниченными ресурсами, а также экономическими и особенно экологическими преимуществами перед традиционными, в основном углеродсодержащими, источниками.

Несмотря на ослабление интереса к ядерной энергетике в некоторых странах, особенно в Европейском Союзе, интерес к этому источнику энергии в странах Востока и Азии возрастает (Китай, Индия и т. д.).

Мирное использование энергии ядер  $U$  и  $Pu$  стало возможным после создания ядерного реактора, в котором выделяемая в результате реакции деления ядер энергия преобразуется в созидательную тепловую энергию пара.

Основным элементом активной зоны ядерного реактора является тепловыделяющая сборка, состоящая из тепловыделяющих элементов (ТВЭЛов), в которых непосредственно и находится ядерное топливо (делящиеся изотопы). Ядерное топливо должно быть работоспособно как в нормальных условиях работы реактора, так (и это главное) в условиях потери теплоносителя. В настоящее время разработкой такого топлива занимаются во многих странах, использующих ядерную энергию в мирных целях.

По мнению многочисленных исследователей, такое топливо можно разработать только на основе высокотеплопроводных ураноемких соединений — карбидов или нитридов. Для повышения химической устойчивости этих соединений предлагается использовать покрытия из карбидов и нитридов тугоплавких соединений ( $SiC$ ,  $ZrC$ ,  $NbC$ ,  $TiN$ ,  $ZrN$  и др.). На основе опыта, накопленного при разработке топлива высокотемпературных газоохлаждаемых реакторов, для топлива реакторов на тепловых нейтронах считается целесообразным использовать покрытия типа BISO на основе одного и того же материала.

Однако сведения о свойствах нового вида топлива, необходимые научным работникам, инженерам и конструкторам, систематизированы пока недостаточно. Данные, приведенные в монографиях рядом коллективов авторов во главе с Займовским А. С. «Тепловыделяющие элементы атомных реакторов», 1966 г.; Самойловым А. Г. «Дисперсионные твэлы», 1965 г., 1982 г., «Тепловыделяющие элементы ядерных реакторов», 1996 г.; Скоровым Д. М. «Реакторное материаловедение», 1962, 1968, 1979 гг., в основном касаются использования покрытия при разработке ядерного топлива дисперсионного типа.

Несмотря на интенсивные исследования по разработке топлива для реакторов поколения IV, нет достаточно полных обзоров и монографий по свойствам

и получению ядерного топлива на основе высокотеплопроводных и ураноёмких соединений с покрытиями.

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 частиц делящихся материалов с покрытиями, выбора материалов покрытия, влияния такого вида топлива при нормальной работе реактора и особенно в экстремальных условиях. Авторы надеются, что книга будет полезна для широкого круга научных работников, инженеров и конструкторов, занимающихся разработкой твэлов для реакторов поколения IV.

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 разработки нового топлива для перспективных реакторных систем.

Авторы приносят искреннюю благодарность Ю. С. Борисову, Т. Н. Жарковой, К. П. Лукину и О. В. Проценко за их бескорыстный труд и неоценимую помощь в подготовке рукописи книги к печати.

## Основные условные обозначения и сокращения

АЭС — атомная электростанция

ТВЭЛ — тепловыделяющий элемент

ТВС — тепловыделяющая сборка

АЗ — активная зона

ИР — исследовательский реактор

ЯЭУ — ядерная энергетическая установка

LWR — легководный реактор

HTGR — высокотемпературный газоохлаждаемый реактор

PyC — пироуглерод

1PyC — внутренний слой пироуглерода

0PyC — наружный слой пироуглерода

КПД — коэффициент полезного действия

ГПД — газообразный продукт деления

E — модуль упругости

P — давление

T — температура

$\lambda$  — коэффициент теплопроводности

$\alpha$  — коэффициент линейного расширения

$\rho$  — теоретическая плотность

## Введение

Трагедии на АЭС Чернобыля и Фукусимы остро поставили вопрос о мирном использовании ядерной энергии. Без решения вопроса о безопасности использование ядерной энергии в мирных целях затруднено, несмотря на то что многие страны не отказываются от строительства ядерных реакторов.

В связи с этим Международный форум (GIF) предложил для дальнейшего развития шесть типов ядерных реакторов, при разработке которых наряду с экономичностью значительное внимание акцентировал на безопасности. В настоящее время безопасность ядерных реакторов в основном определяется проектно-конструкторскими решениями и регламентом эксплуатации. В рамках программы Международного форума «Поколение IV» (GIF) значительное внимание уделено разработке конструкционных материалов и ядерного топлива, которое должно обладать повышенной стойкостью как в нормальных условиях работы, так и в аварийных ситуациях, особенно при потере теплоносителя.

В книге рассматривается альтернативное оксидному ядерное топливо для использования в реакторах поколения IV. Предполагается, что оно будет более устойчиво в аварийных условиях, особенно при потере теплоносителя.

Книга состоит из шести глав. В первой главе дан обзор состояния мировой энергетики и места в ней ядерной энергетики. Кратко характеризуются реакторы до 3+ поколения и приводятся рекомендации Международного форума (GIF) по дальнейшему реакторостроению. В главе 2 даны характеристики разработанных к настоящему времени соединений делящихся изотопов. Главы 3 и 4 посвящены получению сферических частиц делящихся материалов и нанесению на них противоосколочных покрытий. Глава 5 посвящена рассмотрению свойств делящихся материалов с покрытиями при использовании в разрабатываемых реакторах поколения IV. Особое внимание уделено выбору материала покрытий. В последней 6 главе описываются случаи возможного применения делящихся материалов с покрытием в исследовательских и легководных реакторах.

# ГЛАВА I

## МИРОВОЕ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЕ И ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГЕТИКА

Устойчивое развитие человечества в настоящее время сталкивается с проблемой энергообеспечения. Доступность и стабильность энергоснабжения всегда имели большое значение для развития современного общества, и эта ситуация сохранится и в будущем. В связи с этим энергетика развивается опережающими темпами по сравнению с другими отраслями производства, а производство электроэнергии является ключевым фактором прогресса в других отраслях промышленности, сельском хозяйстве и для повышения уровня жизни. Согласно данным [1–5], ожидается рост мирового потребления энергии в 1,5–3 раза к 2050 году и в 2–5 раз к 2100 году.

### 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 требует дополнительного притока энергии. Без потребления энергетических ресурсов не обходится ни одна сторона жизнедеятельности человека (рис. 1.1).

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



Рис. 1.1. Диаграмма потребления энергетических ресурсов [5]

для получения электрической энергии. На рис. 1.2 показана доля различных видов энергии в общем мировом первичном энергобалансе на конец 2007 г.



Рис. 1.2. Структура общего мирового энергобаланса [6]

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, (ветер, энергия рек), энергия морских приливов и отливов, геотермальная энергия и так далее.

Однако основными источниками для производства электроэнергии являются уголь, газ, гидроэнергия (ГЭС) и ядерная энергия (рис. 1.2). Другие источники энергии могут оказывать заметное влияние на энергообеспечение только в некоторых странах. Необходимо учитывать и тот факт, что такие источники энергии, как ветер и солнечное излучение, не являются надежными источниками для промышленного производства электроэнергии в связи с их сильной зависимостью от расположения на земной поверхности.

В настоящее время на 85 % энергетические потребности 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 необходимы для быстро развивающегося транспорта и нефтехимии.

Прогноз потребления энергии в мире до 2050 года показывает, что доля электроэнергии в мире будет увеличиваться (рис. 1.3).

Увеличение объема энергопотребления ведет к все возрастающему 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 веществами и 70 % теплового загрязнения [7].

Основными загрязнителями атмосферы на теплоэнергостанциях являются оксиды серы и азота, соединения фтора и частицы угольной золы и несгоревшего

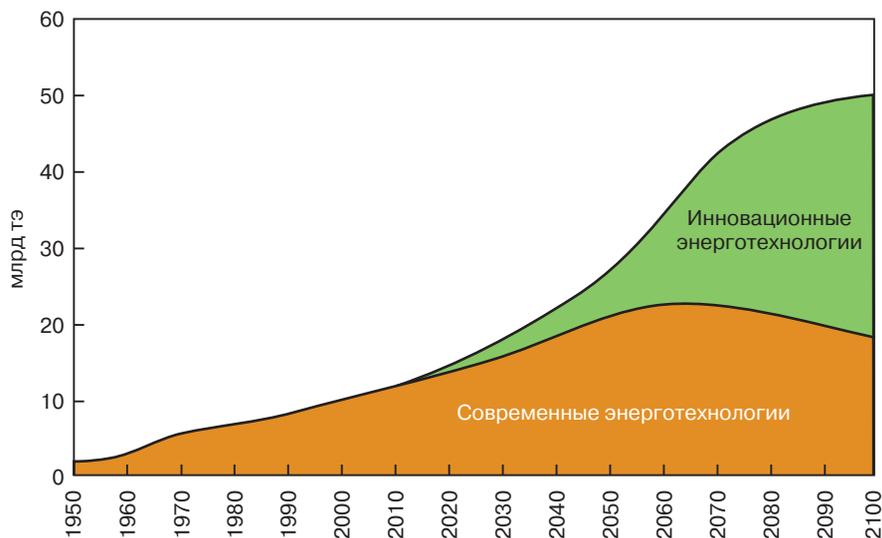


Рис. 1.3. Прогноз динамики энергопотребления в XXI веке [1]

топлива [8]. С выбросом в атмосферу оксидов серы и азота связывают развитие таких негативных глобальных экологических явлений, как «кислотные дожди». Последние 50 лет проблема влияния вредных веществ на окружающую среду приобрела важное значение [9].

На третьей конференции об изменении климата в 1997 году в г. 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 вредных веществ в атмосферу для всех промышленно развитых государств. За превышение выбросов сверх разрешенных уровней установлены санкции. Практически все участники климатической конференции COP 21 (Париж, 2015 г.) были едины в признании необходимости перехода к будущей энергетике с низким содержанием углерода [10].

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

По данным [11], в области электроэнергетики половина новых мощностей, вводимых в действие в мире до 2035 года для удовлетворения растущего спроса, будет приходиться на возобновляемые источники энергии, главным образом ветроэнергетику. Однако следует иметь в виду нестабильность возобновляемых источников энергии. Согласно [7] 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 сейчас примерно в 3–4 раза выше по сравнению с существующей атомной энергетикой. Международное энергетическое агентство (IEA) в 2015 г. представило доклад о развитии ядерной энергетики в течение ближайших 20 лет [10]. В докладе отмечается, что без решительных действий в отношении эмиссии углекислого газа его выбросы в окружающую среду почти удвоятся к 2050 г. На перспективу развития ядерной энергетики в значительной мере повлияла авария на АЭС «Фукусима». Тем не менее в настоящее время (на конец 2014 г.) в стадии строительства находятся 72 реактора и многие страны не намерены сокращать свои планы относительно развития ядерной энергетики.

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 [10]. Сегодня ядерная энергия используется для производства электроэнергии, однако производство тепла для промышленного применения представляет собой еще один огромный энергетический рынок. На этом энергетическом рынке в настоящее время доминирует ископаемое топливо, являющееся источником выброса в окружающую среду огромного количества  $\text{CO}_2$ .

Уже в настоящее время действующие российские атомные электростанции ежегодно предотвращают выброс в атмосферу примерно 210 млн тонн  $\text{CO}_2$ , а в целом атомные станции мира позволяют предотвратить выброс до 3,4 млрд тонн углекислого газа, который считается основным фактором

глобального потепления [8]. Внешний вид атомной электростанции (АЭС) показан на рис. 1.4.



Рис. 1.4. Внешний вид Ровенской АЭС (Украина) [12]

## 1.2. Ядерная энергетика

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 22500 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.

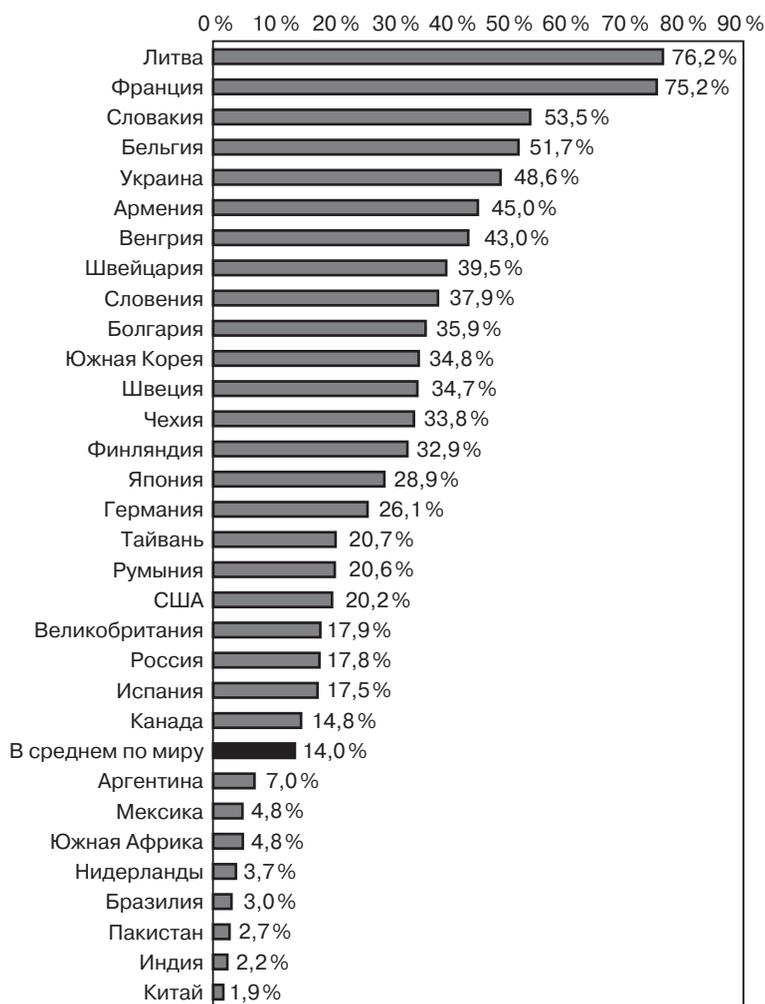
Овладение энергией атома стало возможно после создания ядерного реактора устройства, в котором обеспечиваются условия самоподдерживающейся цепной реакции деления изотопов урана или плутония. Энергия, выделяющаяся в процессе деления, является источником тепловой энергии, которую можно преобразовать в нужную форму.

В промышленно развитых странах (Франция, Бельгия, Словакия 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 энергетика имеют около 30 стран, свыше 60 новых стран проявляют большой интерес к ядерной энергетике.

Согласно базе данных по энергетическим реакторам (PRIS), на 31 июля 2016 г. в мире эксплуатируется 447 ядерных энергоблоков общей установленной мощностью 389051 МВт эл. С начала 2016 г. произошли энергозапуски шести ядерных энергоблоков (Китай, США, Индия) [13].

В мире доля ядерной энергетике достигла 14 % общего объема вырабатываемой электроэнергии. Перешагнули порог 50 % доли атомной электроэнергетики в общей выработке электричества Франция, Словакия и Бельгия (рис. 1.5).



**Рис. 1.5.** Доля атомной энергетике в суммарном производстве электроэнергии в различных странах мира, % [14]

Из 13 стран, где доля ядерной электроэнергетики превысила 1/3, кроме Южной Кореи, все находятся в Европе. Из приведенных данных (рис. 1.5) 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 и теплом. Внедрение атомной энергетике в неэлектрические сферы потребления энергетических ресурсов позволяет использовать энергию мирного атома в промышленности, на транспорте, в коммунальном секторе [15]. Важно и то обстоятельство, что атомная энергетика доступна для всех, в том числе для малодоступных регионов мира, и технически подготовлена для масштабного развития. Этот вид энергии практически экологически чистый.

Основное использование энергии деления атомов в настоящее время осуществляется в реакторах на тепловых нейтронах, которые еще в сороковых годах 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 применяются более чем на 80 % эксплуатируемых в мире АЭС, использующих открытый топливный цикл [16].

В настоящее время основным топливом 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  $\sim 10^{14}$  тонн, однако добыча урана в настоящее время экономически выгодна только в тех местах, где концентрация урана в руде более 0,1 % [17]. Основным фактором, ограничивающим масштабное развитие ядерной энергетике, является ограниченность доступных запасов урана-235. По своему энергетическому потенциалу его запасы не намного превышают запасы нефти [18].

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.

Реализация возможностей ядерной энергии, по данным работы [7], достижима лишь на основе освоения замкнутого ядерного топливного цикла (ЯТЦ) с вводом реакторов, обеспечивающих простое или расширенное воспроизводство ядерного топлива. Реакторы на быстрых нейтронах позволяют не просто «сжигать» природный уран-235, а вырабатывать при этом новое топливо [15]. 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.

Замыкание топливного цикла, разработка быстрых реакторов с расширенным воспроизводством топлива и высокотемпературных реакторов с газовым охлаждением, по мнению большинства специалистов, могут рассматриваться в качестве ключевого направления инновационного развития атомной энергетики [7, 17, 18, 19].

Развертывание крупномасштабной ядерной энергетике для производства электроэнергии, тепла для промышленных целей и отопления для энергоснабжения металлургической и химической промышленности позволит экономить нефть и газ для тех целей, где их сложнее всего заменить [19].

При многих преимуществах мирного атома есть очевидные недостатки. Это потенциальная опасность для людей и окружающей среды и огромные затраты 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 года 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: Австрии, Германии, Бельгии, Италии, Швейцарии, в настоящее время не рассматривают возможность строительства новых реакторов. В Японии в 2012 году из 54 ядерных реакторов работали 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. 1.1.

Китай (эксплуатируется 35 реакторов) и Индия (более 20 реакторов) сохраняют программу строительства атомных электростанций в прежнем объеме [10]. Правительство Китая планирует увеличить к 2020 г. мощности АЭС до 58 ГВт эл., а Индия планирует к 2050 году довести выработку электроэнергии на АЭС до 25% [11,13]. Первым ядерным энергоблоком, вступившим в строй в 2016 г., стал южно-корейский Shin-Kori-3. Два китайских энергоблока Ningle-4 и Hanguange-4 вступили в строй 23.03.2016 и 01.04.2016 соответственно [13].

Большинство стран, развивающих атомную энергетику (Финляндия, Словакия, Тайвань, Южная Корея, Бразилия, Аргентина, Великобритания, в том числе РФ), подтвердили планы на строительство новых энергоблоков. Такие страны, как Турция, Вьетнам, Бангладеш, также не отказываются от планов

Таблица 1.1. Отношение к использованию ядерной энергетике [12]

Страна	Выработка электроэнергии на АЭС, % к общей выработке (2010 г.)	Планы по отношению к ядерной энергетике
Япония	28,9	В 2013 г. работали 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 энергетике в 2015 г., которое должно завершиться в 2025 г.
Нидерланды	3,7	Строительство энергоблока № 2 АЭС «Барселе» отложено.
Италия		Отказалась от намерения возврата к ядерной энергетике.

сооружения АЭС [18]. По оценке МАГАТЭ, минимальный рост ядерной энергетике в мире составит 25 % к 2035 году, максимальный — приведет к удвоению мощностей АЭС [10]. Наибольший рост будет в дальневосточном регионе.

Согласно [20] установленная электрическая мощность АЭС в мире должна возрасти с 370 ГВт в 2009 году до 2000 ГВт к 2050 году, то есть мощности АЭС должны возрасти в 5–6 раз по сравнению с нынешними [15]. По состоянию на 1 апреля 2010 года во всем мире строились 52 ядерных реактора, 144 реактора находились в стадии проектирования; рассматривались также предложения по строительству еще 344 реакторов [14].

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 [18]. По приведенной стоимости ядерная энергия уже сейчас способна конкурировать с ископаемым топливом [19, 21, 22]. Однако высокие капитальные затраты на строительство новых АЭС и долгий срок их окупаемости затрудняют выход ядерной энергии на коммерческий рынок.

Одним из немногих типов ядерных реакторов, способных обеспечить потребности промышленности как в технологическом тепле, так и в электроэнергии, является высокотемпературный газоохлаждаемый ядерный реактор (HTGR). Первые разработки газоохлаждаемых реакторов проводились в 1956–1958 гг. в США и Германии. К этому же периоду относятся и первые успехи в создании газоохлаждаемого реактора в Великобритании. Эксплуатация экспериментальных высокотемпературных газоохлаждаемых реакторов (HTGR): Dragon (Англия), Peach Bottom (США) и AVR (Германия), позволили получить

информацию по теплофизике реакторов, поведению топлива, характеристикам отдельных узлов активной зоны, ядерной безопасности, надежности в аварийных ситуациях и т. д. Накопленный при эксплуатации экспериментальных HTGR опыт позволил приступить к проектированию и строительству реакторов прототипов Fort St. Vrain (США) и THTR (Германия).

Как показывают результаты многолетних исследований и опыт эксплуатации первых высокотемпературных газоохлаждаемых реакторов HTGR, они имеют ряд преимуществ по сравнению с другими типами реакторов [23, 24]:

- высокий уровень температуры теплоносителя на выходе из активной зоны,
- более высокий коэффициент полезного действия при производстве электроэнергии,
- лучшее использование ресурсов урана и тория,
- высокую степень ядерной безопасности,
- меньшее тепловое загрязнение окружающей среды,
- возможность дальнейшего повышения температуры газа на выходе из активной зоны.

Высокотемпературные газоохлаждаемые реакторы HTGR являются наиболее удачными из газоохлаждаемых реакторов. Конструкция реактора позволяет получать низкое среднее значение плотности мощности в активной зоне, что обуславливает высокую работоспособность топлива и возможность эксплуатации при высоких температурах. Одним из перспективных направлений развития реакторов HTGR, реализующих основные преимущества высокотемпературных газоохлаждаемых реакторов, является разработка реакторов с прямым газотурбинным циклом для получения технического тепла наряду с электроэнергией. Работы в этом направлении проводились в США, Германии, Японии, Франции, Великобритании, Швейцарии и ряде других стран. Однако к концу 1975 года разработки АЭС с реакторами HTGR в США были приостановлены. Это было вызвано, в основном, более высоким (на 10–15 %) по сравнению с легководяными реакторами уровнем первоначальных капитальных затрат. Одной из главных проблем является недостаточная проработка топливного цикла, включая создание производства для изготовления твэлов, а также переработка облученного топлива [25]. В настоящее время развивается направление HTR Китая, который строит первый опытно-промышленный блок HTR-PM.

### 1.3. Реакторы атомных электростанций

Использования ядерной энергии для производства электроэнергии добились ряд стран (США, СССР, Франция, Великобритания) в начале 20-го века (1950–1965 гг.) [26].

Наибольшее распространение в мире получили тепловые водо-водяные реакторы, которые в основном и работают сейчас на атомных электростанциях. Это реакторы корпусного типа с водой под давлением (PWR — Pressurized Water Reactor). Некоторые типы этих реакторов — это прототипы энергетических реакторов, существующих в настоящее время. По международной квалификации эти реакторы относятся к поколению I.

Следующие реакторы (поколение II) — коммерческие реакторы, которые появились примерно в 30 странах (1970–2000 гг.). Более усовершенствованные легководные реакторы (LWR — Light Water Reactor) с теплоносителем под давлением (PWR) и с кипящим теплоносителем (BWR) работают и в настоящее время (табл. 1.2).

**Таблица 1.2.** Эксплуатируемые по данным на апрель 2013 г. реакторы поколений II и III

№ п/п	Страны	Число блоков	ГВт эл. нетто
1.	США	103	103
2.	Франция	58	63
3.	Япония	50	44
4.	Россия	33	24
5.	Ю. Корея	23	21
6.	Канада	19	13
7.	Украина	15	13
8.	Германия	9	12
9.	Китай	15	12
10.	Швеция	10	9
11.	Великобритания	16	9

К реакторам поколения II относятся и реакторы CANDU (Canadian Deuterium-Uranium Reactor), и РБМК (реактор большой мощности канальный, СССР). Реакторы поколения II работают по принципу открытого топливного цикла. В мире построено к настоящему времени более 550 ядерных энергетических реакторов, 110 самых старых из них уже остановлены. Более 30 лет эксплуатируются 134 реактора. Из них 9 реакторов проработали не менее 40 лет. Реакторы поколения II за время эксплуатации продемонстрировали их вполне удовлетворительную работоспособность, надежность и рентабельность [27, 28].

Современные реакторы — поколение III (1995–2010 гг.). Это реакторы с водяным охлаждением и тепловым КПД 30–36%, охлаждаемые диоксидом углерода (КПД до 42%) и охлаждаемые жидким натрием — КПД до 40%.

К поколению III+ (2010–2025 гг.) относятся реакторы с улучшенными параметрами, в том числе реакторы с водяным охлаждением и КПД до 38%.

Во всем мире примерно три четверти реакторов атомных станций используют в качестве замедлителя нейтронов и теплоносителя обычную воду. Как отмечалось выше, такие реакторы называются водо-водяными (ВВЭР) или в международной классификации — PWR. На рис. 1.6 представлена схема устройства АЭС с водо-водяным реактором.

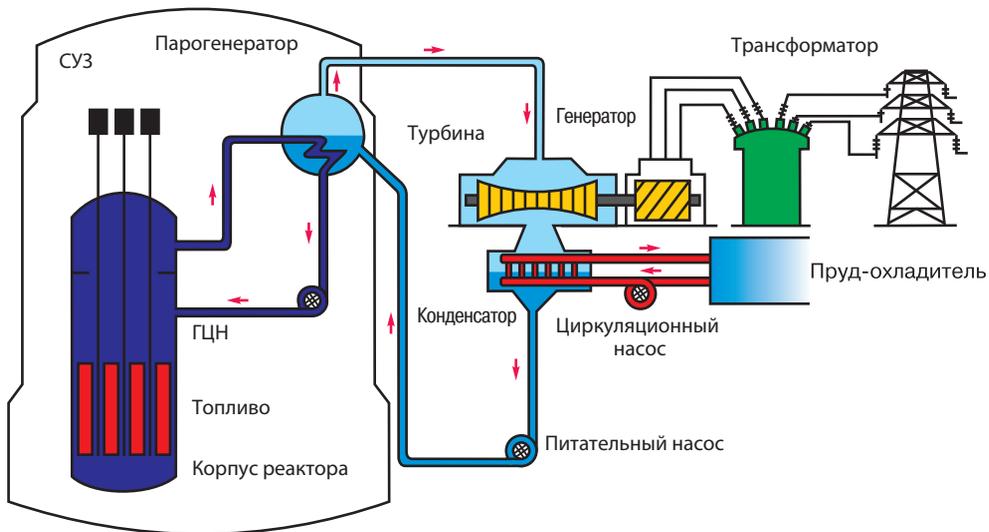


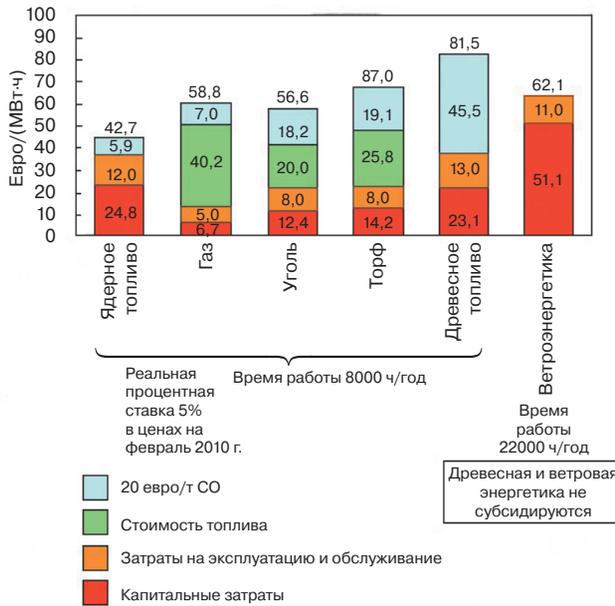
Рис. 1.6. Схема АЭС с реактором типа ВВЭР (PWR) [12]

Несмотря на то что при строительстве АЭС начальные капиталовложения достаточно велики, себестоимость выработки 1 МВт·ч электричества более низка, чем при использовании органического топлива, особенно в связи с налогом на выброс вредных веществ (рис. 1.7) [27, 29].

Надо иметь в виду, что при использовании ядерной энергии не выбрасываются в атмосферу вредные вещества.

Вместе с тем эксплуатация ядерных реакторов выявила ряд проблем. Слабым местом современных ядерно-энергетических технологий является ограниченное использование энергетического потенциала уранового топлива. С этой проблемой тесно связан вопрос о дальнейшей судьбе облученного топлива после его выгрузки из реактора. В Европе к 2008 году количество такого топлива составляло не менее 55000 тонн, а к 2060 г. потребуется хранилищ для 1,5 млн тонн облученного топлива [27]. Наличие отработанного ядерного топлива вызывает необходимость решать задачу переработки и окончательного безопасного захоронения отходов.

Все эксплуатируемые реакторы, в том числе и поколения III+, не совсем конкурентоспособны с точки зрения их теплового КПД. Разность теплового



**Рис. 1.7.** Сравнение себестоимости электричества, полученного от ископаемого топлива, делящихся изотопов и возобновляемых источников энергии [27]

КПД тепловых и ядерных электростанций может достигать 20–30% [30]. Наиболее высокий КПД имеют теплоэлектрические станции (ТЭС), работающие на газе (табл. 1.3).

**Таблица 1.3.** Значение КПД различных технологий производства электричества [17]

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

## 1.4. Реакторы поколения IV

В ходе эксплуатации реакторов поколения II и последующих поколений III и III+ проводились исследования, направленные на поиск новых технологий и способов модернизации действующих АЭС.

В начале 2000 годов группа стран, включающая Канаду, страны Европейского Союза, Японию, Россию, США и другие, инициировала международное сотрудничество в области разработки ядерных реакторов следующего поколения. Международный форум (Generation IV International Forum-GIF, 2001) по этому вопросу состоялся в 2001 году. На GIF была принята программа, направленная на инициирование НИОКР по разработке реакторов поколения IV.

В результате оценки, выполненной группой, состоящей из 100 экспертов — ведущих специалистов по атомной энергетике, было выбрано шесть базовых концепций реакторов поколения IV, разработка которых призвана решить следующие основные задачи:

- длительная бесперебойная работа АЭС, которая должна обеспечить оптимальное использование ядерного топлива, надежность энергоснабжения и обращения с отходами, их минимизацию и защиту окружающей среды,
- конкурентоспособность ядерной энергетике,
- безопасность и надежность АЭС,
- обеспечение гарантий нераспространения делящихся материалов.

Международный форум GIF предложил к разработке следующие концепции реакторов поколения IV:

- быстрый реактор с газовым охлаждением (GIF) или высокотемпературный реактор (HTR),
- реактор с очень высокой температурой (VHTR),
- быстрый реактор с натриевым теплоносителем (SFR),
- быстрый реактор со свинцовым теплоносителем (LFR),
- реактор на расплаве солей или жидкосолевой реактор (MSR),
- реактор, охлаждаемый сверхкритической водой (SCWR).

**GIF** — быстрый реактор с газовым охлаждением или (HTR), высокотемпературный реактор с быстрым нейтронным спектром, который может использоваться для совместного производства электричества и водорода [29, 31].

**VHTR** — высокотемпературный реактор с тепловым спектром нейтронов и газовым охлаждением. Основная цель этого реактора — производство водорода наряду с усовершенствованным производством электричества и высокотемпературной технологической тепловой энергией [29, 32].

**SFR** — реактор с быстрым спектром нейтронов с теплоносителем из Na, основными целями которого являются управление радиоактивными отходами высокого уровня активности и производство электроэнергии [29].

**LFR** — реактор на быстрых нейтронах с жидкометаллическим теплоносителем (свинцовым как основным или свинцово-висмутовым в качестве резервного). Этот реактор может работать как бридер с ториевой матрицей [29, 33].

**MSR** — жидкосольевой реактор на быстрых нейтронах [29]. Жидкосольевой реактор может работать на основе ториевого топливного цикла с воспроизводством  $^{233}\text{U}$  из  $^{232}\text{Th}$ . В связи с предлагаемым применением ториевого топлива следует отметить, что в этом случае в отработанном топливе отсутствуют высокоактивные вещества [25].

**SCWR** — водо-водяной реактор предполагается разрабатывать в двух основных концепциях: Европейский высокоэффективный легководный реактор (HPLWR) и Канадский тяжеловодный реактор (CANDU) [34–36].

В рамках программы GIF в 2002 году была подготовлена технологическая дорожная карта, являющаяся планом разработки и внедрения новых технологий, которые должны составить основу атомной энергетики 21-го века [36, 37]. В табл. 1.4 представлены десять активных членов GIF, разрабатывающих конкретные концепции перспективных ядерно-энергетических установок на основе реакторов поколения IV.

В табл. 1.5 приведены некоторые ключевые параметры реакторов поколения IV.

**Таблица 1.4.** Страны, ведущие разработки реакторов поколения IV в рамках программы GIF [38]

Страна, член GIF	Типы реакторов поколения IV					
	SFR, быстрый реактор, охлаж. Na	VHTR, сверхвысокотемпературный реактор	SCWR, реактор, охлаж. водой СКД	GFR, быстрый реактор, охлаж. газом	LFR, быстрый реактор, охлаж. Pb	MSR, реактор на расплаве солей
«Евратом»	•	•	•	•	М	М
Канада			•			
Китай	•	•	•			
Россия	•		•		М	
США	•	•				М
Франция	•	•		•		
Швейцария	•	•		•		
ЮАР		•				
Южная Корея	•	•				
Япония	•	•	•	•	М	

Примечание: • — системное соглашение, М — Меморандум о взаимопонимании.

**Таблица 1.5.** Ключевые конструктивные параметры реакторов поколения IV [27, 38, 39]

Параметр	Тип реактора					
	GFR (HTR)	VHTR	SFR	LFR	MSR	SCWR
Спектр нейтронов	Быстрый	Тепловой	Быстрый	Быстрый	Тепловой	Быстрый (тепловой)
Теплоноситель	Гелий	Гелий	Натрий	Свинец	Расплав солей (фториды, хлориды)	Сверхкритическая вода
Температура теплоносителя вход/выход, °C	490/850	640/1000	>98/530–550		565/700 (800)	280/530
Тепловой КПД, %	~48	>50	40–42		44–50	43–45
Тип твэла	Пластинчатые, стержневые	Шаровые диам. 60 мм	Стержневой	Стержневой	Расплав неорганических соединений	Стержневой
Топливный цикл		Открытый	Закрытый	Открытый или закрытый		Открытый
Ожидаемое выгорание, ГВт·сут/Т (Мт)		~200	~150–200			

Примечание: МТ — тяжелый металл.

По состоянию на 2014 г. в рамках программы GIF реализуется 10 проектов: SFR — четыре, VHTR — три, GFR — один, SCWR — четыре [38]. На рис. 1.8 и 1.9 показаны схемы реакторов VHTR и SCWR.

Реактор SFR представляет единственную концепцию выбранных энергетических реакторов, осуществленную в промышленном масштабе в России и Японии.

Технологическая дорожная карта разработки реакторов поколения IV предполагает уделять значительное внимание материаловедческим исследованиям ядерного топлива и материалов, используемых для оболочек твэлов и внутрикорпусных устройств. Согласно данным работы [38] предполагаемые затраты на эти исследования для реактора SCWR составляют более 57% всех затрат (рис. 1.10).

Это связано с тем, что основной частью активной зоны реактора является тепловыделяющий элемент (твэл), представляющий собой ядерное топливо в том или ином виде, загерметизированное в оболочке. Наиболее распространенной формой твэла является цилиндрический стержень разной длины (рис. 1.11). В зависимости от назначений реактора используются и другие виды топливных элементов (табл. 1.5).