



# ИНФОРМАЦИОННЫЙ БЮЛЛЕТЕНЬ

№ 3-4(11-12)

2012

## СЕРИЯ: АТОМНАЯ ЭНЕРГЕТИКА

### ИННОВАЦИОННЫЕ ЯДЕРНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ПОКОЛЕНИЯ IV

Приближение постнефтяного периода в развитии человеческой цивилизации настоятельно требует поиска решений грядущих глобальных проблем – энергообеспечения, экологии, изменения климата, безопасности и т. д. Все указанные проблемы, в том числе, замена экономики на основе углерода водородной экономикой, находятся на современном этапе (по принципу «будущее создается сегодня») в центре международных обсуждений и усилий.

В настоящее время исследования сосредотачиваются на ядерных системах нового Поколения IV. Общая цель состоит в том, чтобы производить не только электричество, но и развивать также другие применения этих систем, такие, как производство водорода из воды, синтетического топлива для транспорта, тепловой энергии для химической промышленности и опреснения воды.

С IV поколением ядерной технологии термин «реактор» заменяется более корректным термином «система», что включает в себя как непосредственно реакторную установку, так и ее ядерный топливный цикл, переработку (рециклирование) ядерного топлива. Такие новые системы должны обладать более высокими эксплуатационными показателями, чем предыдущие поколения, в области обеспечения устойчивого развития, конкурентоспособности, безопасности и надежности, а также защиты от распространения, оправдывая использование в их отношении выражения «технологический прорыв».

Как предполагается, они обеспечат экономически эффективное и безопасное максимальное использование энергетического потенциала природных ресурсов (благодаря размножению делящегося материала), оптимальное обращение с ядерными отходами (рециклирование всех актинидов и незначительные выбросы парниковых газов), минимальные риски распространения, совместное производство тепла и электричества, необходимого для выработки водорода.

Критериальные характеристики реакторов четвертого поколения:

продолжение высокобезопасного и экономичного производства электроэнергии с возможностью других применений, таких, например, как опреснение морской воды и рассолов, производство водорода как основы синтетического горючего и др.;

доступность возможно большему числу стран мира с учетом упрощения систем обеспечения безопасности без ущерба ее качеству, экономической конкурентоспособности реакторов меньших размеров, эффективной защиты от ядерного распространения и террористических акций;

полномасштабное использование огромного количества энергии, содержащейся в делящихся и воспроизводящих материалах – уране и тории;

наработка меньшего объема долгоживущих радиоактивных отходов и включение актинидов в топливный цикл.

## Основные свойства реакторов поколения IV

### *Устойчивое развитие*

Системы IV поколения обеспечат оптимальное использование природных ресурсов и надежность энергоснабжения. Слабой стороной существующих ядерных технологий является их ограниченная способность к использованию энергетического потенциала уранового топлива. Современные тепловые реакторы используют изотоп урана, который составляет лишь менее 1 % общего количества урана, встречающегося в природе. Реакторы-размножители способны использовать значительную часть энергетического потенциала, недоступного тепловым легководным реакторам, в результате чего из того же исходного количества урана может быть произведено в десятки раз больше энергии. Такие реакторы способны преобразовывать  $^{238}\text{U}$  в делящийся  $^{239}\text{Pu}$  даже интенсивнее, чем сами поглощают делящийся материал. Кроме того, они смогут использовать топливо с очень низким содержанием урана, соответствующим его содержанию в руде.

Образование отходов будет минимальным. Недостатком открытого топливного цикла, предусматривающего захоронение отработавшего ядерного топлива без переработки, является объем, уровень радиотоксичности и остаточное тепловыделение ОЯТ.

Предметом многочисленных исследовательских проектов, выполняемых в рамках развития систем поколения IV, являются передовые технологии деления и трансмутации. Ядерно-химические технологии позволят выполнять разделение отработавшего топлива на различные составляющие в зависимости от их дальнейшего использования или требований к захоронению.

### *Конкурентоспособность*

Легководные реакторы II и III поколений характеризуются сравнительно низкой температурой теплоносителя на выходе из активной зоны – около  $300^{\circ}\text{C}$ , что ограничивает их тепловой КПД (около 30-35% для традиционных легководных реакторов). Ожидается, что системы поколения IV будут обладать гораздо более высоким тепловым КПД.

При применении других теплоносителей возможно достижение значительно более высоких температур:  $400-600^{\circ}\text{C}$  для  $\text{CO}_2$ ,  $500-700^{\circ}\text{C}$  для жидких металлов (натрий, свинец) и  $700-900^{\circ}\text{C}$  для гелия (температура теплоносителя на выходе из активной зоны  $900^{\circ}\text{C}$  соответствует тепловому КПД до 44%, то есть приблизительно на треть выше, чем у традиционных легководных реакторов).

В качестве источника энергии для низкоуглеродной экономики будущего перспективен водород. Он может стать ключевым альтернативным источником энергии, действительно надежным и обеспечивающим максимально возможную защиту окружающей среды. Некоторые системы поколения IV могут оказаться единственными чистыми технологическими решениями, обладающими достаточной энергоемкостью для производства значительных объемов водорода из воды с сопутствующим производством электроэнергии.

### *Безопасность и надежность*

Для систем поколения IV остается основополагающим принцип глубоководной защиты со значительными запасами безопасности. Он относится к детерминистическим принципам, что означает выполнение систематического анализа заданных исходных событий и их последствий (проектных аварий). Однако, как показал опыт, для более полного учета неопределенностей, которые неотъемлемо будут присущи инновационным системам поколения IV, подход к обоснованию их безопасности должен носить смешанный, детерминистически-вероятностный характер, обеспечивая тем самым общую гомогенность и согласованность проекта.

В современной атомной промышленности системы обеспечения безопасности, в целом, имеют активный характер, то есть их действие зависит от работы электрических и механических приводов различного оборудования, например датчиков, арматуры, насосов, аккумуляторов, теплообменников и систем внутреннего энергопотребления. Уже реакторы поколения III оснащены более эффективными системами безопасности. В некоторых из них

системы безопасности являются пассивными, что намного более эффективно, надежно и экономично. Тем более, это будет присуще в еще большей степени реакторам Поколения IV.

### ***Нераспространение и физическая защита***

Одним из важных рисков распространения, слабым звеном в ядерных реакторных технологиях является обращение с чистым плутонием (хранение, транспортировка).

На сегодняшний день есть возможность трансмутации относительно небольших количеств гражданского или военного плутония с использованием в составе MOX-топлива в легководных реакторах или быстрых реакторах-размножителях. Быстрые реакторные системы завтрашнего дня – поколения IV и ADS – смогут осуществлять трансмутацию больших количеств не только плутония, но и младших актинидов (в частности, для военных целей).

В 2002 году по результатам рассмотрения более 100 различных проектов членами GIF были выбраны для дальнейших исследований шесть инновационных ядерных систем (в том числе инновационных ядерных циклов). Участники GIF также согласовали планы действий по каждой из шести систем, предусматривающие три этапа общей продолжительностью несколько десятилетий с индивидуальными схемами работ на стадиях:

этап научного обоснования, определение жизнеспособности (решение основных технологических проблем) – от 5 до 15 лет;

этап проработки, определение эксплуатационных качеств (концептуальный проект, оптимизация эксплуатационных показателей) – от 5 до 10 лет;

демонстрационный этап (технический проект и подготовка к промышленной реализации) – от 3 до 6 лет, задача этапа – убедить поставщиков систем и снабженцев энергией в привлекательности проекта.

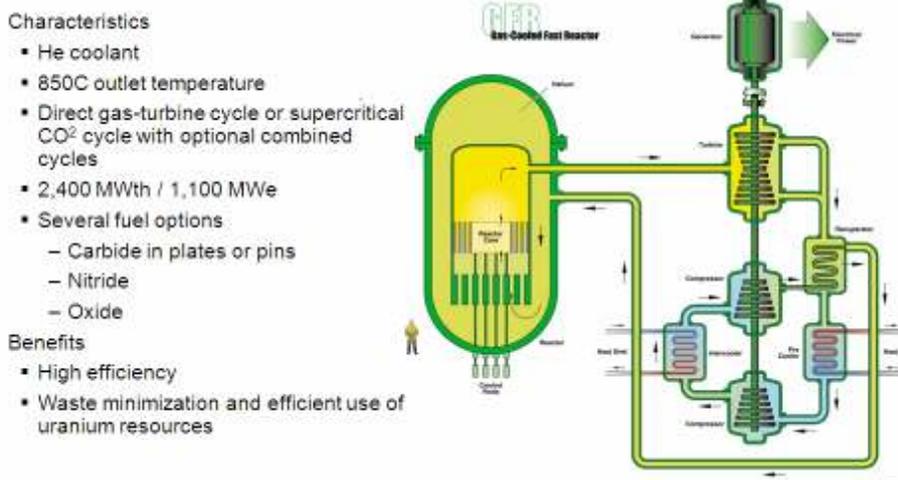
Договоренности в рамках GIF охватывают только первые два этапа. Реализация заключительного демонстрационного этапа будет осуществляться в рамках отдельных соглашений между участниками GIF, поскольку он считается слишком близким к промышленной реализации.

Общая стратегия членов GIF состоит в том, чтобы продолжить строительство реакторов Поколения III до 2020 г. Затем в течение десятилетия (к 2030 г.) будут развернуты первые тепловые реакторы Поколения IV, а в период 2040-2050 гг. – быстрые реакторы Поколения IV.

### **Концепции реакторов Поколения IV, отобранные для исследований**

Главные характеристики отобранных реакторных систем выглядят следующим образом.

***GFR (Gas Fast Reactor) – реактор на быстрых нейтронах с гелиевым теплоносителем и замкнутым топливным циклом.***

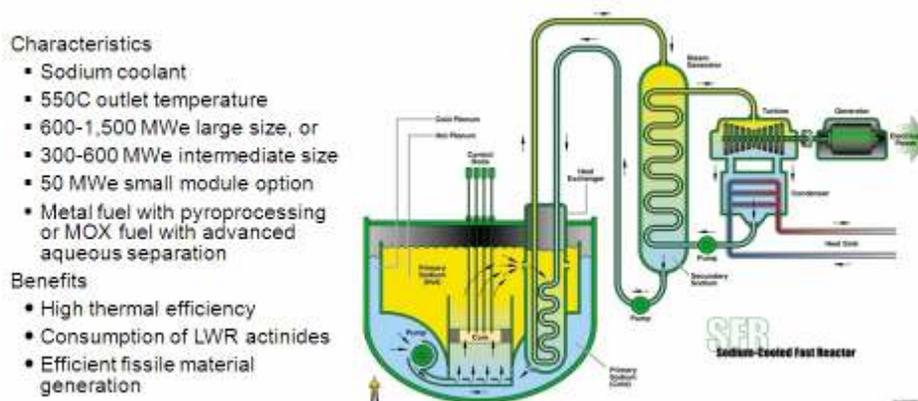


Реактор предназначен только для выработки электроэнергии, производство водорода не предусматривается.

Реакторная система этого типа характеризуется исключительной тепловой эффективностью, поскольку охлаждающий гелий имеет высокую температуру. Система имеет хорошие показатели безопасности, экономичности, а также устойчивости к ядерному распространению и физической защите. Несмотря на высокую инновационность проекта, эта реакторная система находится на стадии проекта, как и соответствующее топливо, над которым еще нужно поработать.

***SFR (Sodium Fast Reactor) – реактор на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем и замкнутым топливным циклом.***

В системе обеспечивается эффективное обращение с актинидами и воспроизводство делящегося материала.



Именно в реакторах на быстрых нейтронах (РБН), функционирующих в режиме расширенного производства, становится возможным практически полное использование энергии урана за счет многократного возвращения урана в цикл. Более того, РБН могут функционировать в режиме рециклирования обедненного урана, остающегося от процесса изотопного обогащения. В РБН можно получить больше делящегося материала, чем сожжено: в активной зоне происходит воспроизводство плутония за счет сгорания урана-238. Если же «довольствоваться» режимом «нулевого воспроизводства» (с восстановлением именно того количества материала, которое было расщеплено) или режимом ограниченного воспроизводства, то в этих случаях остается достаточное количество нейтронов для трансмутации актинидов и значительного снижения долгосрочной токсичности радиоактивных отходов.

Во избежание малейшей реакции между радиоактивным натрием первого контура и водой турбинного контура современные РБН с натриевым теплоносителем оснащены промежуточным контуром с неактивным натрием. Именно введение этого дополнительного контура, а также необходимость использования дорогостоящих сплавов для натриевых контуров значительно увеличивают инвестиционные затраты на сооружение современных РБН по сравнению с реакторами PWR сопоставимой мощности.

Реактор спроектирован для расширенного воспроизводства делящихся материалов и трансмутации актинидов. Можно выделить две главные концепции: первая включает реакторы среднего размера (от 150 до 500 МВт), вторая концепция – реакторы как среднего, так и большого размера (от 500 до 1500 МВт) с МОХ-топливом. Для реализации программы строительства таких реакторов необходимы дополнительные научно-исследовательские работы как в области топливного цикла, так и в области усовершенствования реактора, вследствие существенных рисков данной реакторной линии.

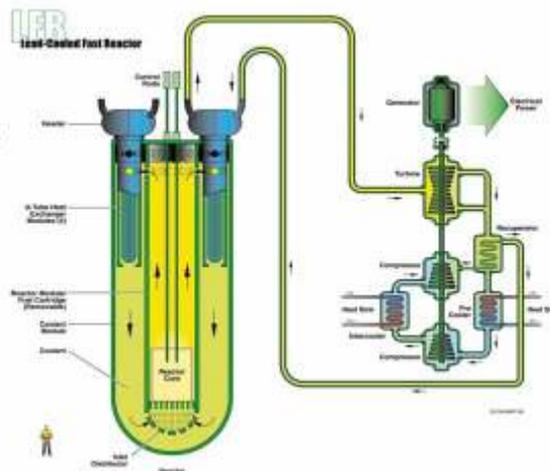
***LFR (Lead Fast Reactor) – реактор на быстрых нейтронах, охлаждаемый свинцом или свинцово-висмутовым жидкометаллическим теплоносителем, с замкнутым топливным циклом.***

**Characteristics**

- Pb or Pb/Bi coolant
- 550C to 800C outlet temperature
- Small transportable system 50-150 MWe, and
- Larger station 300-1,200 MWe
- 15–30 year core life option

**Benefits**

- Distributed electricity generation
- Hydrogen and potable water
- Replaceable core for regional fuel processing
- High degree of passive safety
- Proliferation resistance through long-life core



В такой системе обеспечивается эффективное использование сырьевого урана и надлежащее обращение с актинидами. Планируется, что мощность реакторов может быть очень разной: от малых реакторов с мощностью 50–150 МВт до установок с мощностью 300–400 МВт и даже до 1200 МВт, с пролонгированными топливными кампаниями (замена топлива производится один раз в 10-30 лет). По сравнению с натриевым теплоносителем свинец обладает меньшей химической активностью, но, тем не менее, он токсичен, отличается высокой плотностью и коррозионной активностью. Наиболее оптимальным вариантом LFR с точки зрения задач, поставленных перед четвертым поколением, является установка малой мощности. Данная концепция спроектирована для небольших энергосистем развивающихся стран, которым не требуется полный топливный цикл.

Система LFR имеет высокие показатели по устойчивости работы, что связано с длительностью эксплуатации активной зоны, а также хорошие показатели экономичности и безопасности.

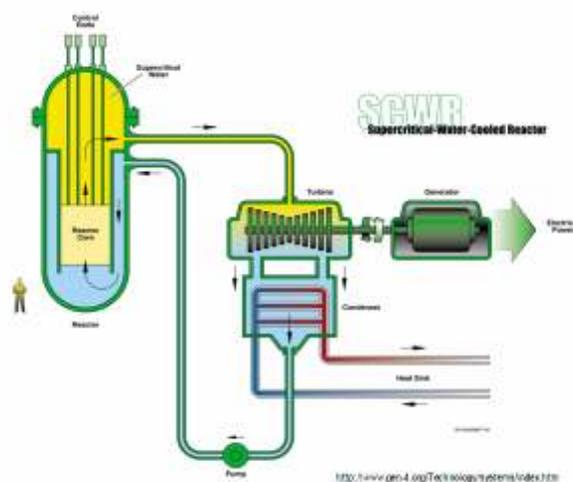
***SCWR (Super Critical Water pressurized Reactor) – высокотемпературный реактор с водным теплоносителем, работающий выше термодинамической критической точки воды.***

**Characteristics**

- Water coolant above supercritical conditions (374C, 22.1 MPa)
- 550C outlet temperature
- 1,700 MWe
- Pressure tube or pressure vessel options
- Simplified balance of plant

**Benefits**

- Efficiency near 45% with excellent economics

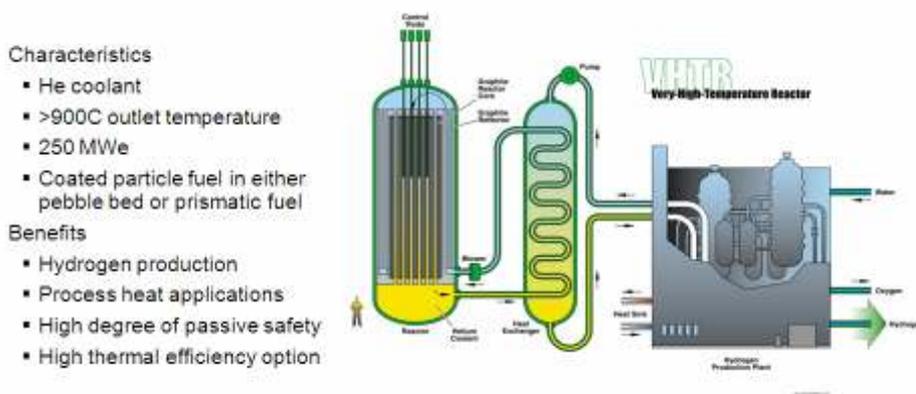


Теплоносителем этого реактора служит вода под сверхвысоким давлением (240 атмосфер). В таких условиях вода – это и не жидкость, и не пар и обладает уникальными характеристиками, позволяющими использовать этот реактор в режиме «почти» реактора на быстрых нейтронах с расширенным воспроизводством или в режиме реактора на замедленных нейтронах с высоким тепловым КПД для открытого топливного цикла.

Материалы для этого реактора с характеристиками, позволяющими обеспечить его безопасную эксплуатацию в условиях высоких температур и давления, еще предстоит разработать и сертифицировать. Базисная установка имеет мощность 1700 МВт. Топливом является оксид урана. Пассивные системы безопасности похожи на упрощенные реакторы с кипящей водой (SBWR).

Реакторы SCWR более экономичны, нежели легководные, благодаря упрощенному устройству реактора. На данный момент не было создано ни одного прототипа. Большинство членов GIF проявляет высокую заинтересованность в разработке SCWR – практически такую же, как и к газоохлаждаемым реакторам.

***VHTR (Very High Temperature Reactor) – высокотемпературный реактор с графитовым замедлителем, гелиевым теплоносителем и открытым урановым топливным циклом.***



VHTR является следующим шагом в эволюционной разработке высокотемпературных газоохлаждаемых реакторов (HTGR). Технология основана на нескольких демонстрационных проектах, у каждого из которых имелся достаточно короткий срок службы. Мощность реактора 600 МВт. Гелий работает как теплоноситель при высоких температурах (уровень 1000 °С). Топливом для этого реактора служат микросферические гранулы, покрытые прочной оболочкой, которые были разработаны для его предшественника HTR в 70-е годы прошлого века. Существуют два различных аналога тепловыделяющей сборки для сверхвысокотемпературного реактора: блок в форме призмы, «прошитый» газовыми каналами, и шаровой твэл.

Технология сверхвысоких температур делает этот реактор идеальным для режима когенерации, т. е. комбинированного производства электроэнергии и тепла. Рассматривается в качестве самой многообещающей и перспективной системы для производства водорода путем каталитического термохимического разложения молекулы воды, однако нуждается в разработке усовершенствованного топлива и высокотемпературных материалов.

***MSR (Molten Salt Reactor) – реактор на расплавленных солях с надтепловым спектром и полным выжиганием актинидов.***

Урановое топливо расплавляется в соли фторида натрия и в виде жидкого расплава солей циркулирует в первом контуре по графитовым каналам активной зоны, выполняя одновременно и роль теплоносителя.

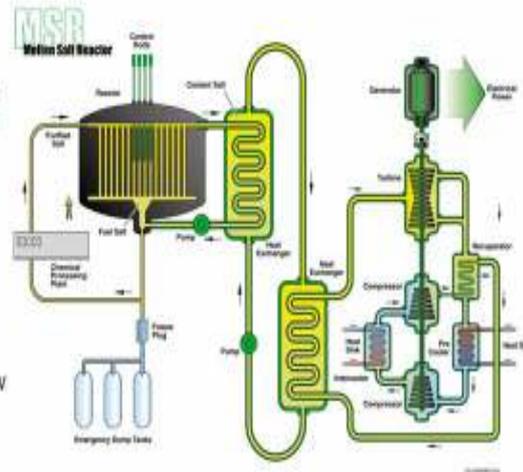
Тепло, вырабатываемое в расплавленной соли, отводится во второй контур. Данный тип установки первоначально проектировался для выработки электричества и сжигания отходов. Базисная установка имеет мощность 1000 МВт. Температура охлаждения составляет 700°С при низком давлении. Жидкий теплоноситель-топливо должен постоянно проходить процедуру очистки на присоединенном к реактору мини-заводе по переработке этого топлива. Реакторная система такого типа представляет интерес прежде всего применительно к использованию тория. Проблемным является подбор материалов, которые сохраняли бы работоспособность при столь высоких температурах.

#### Characteristics

- Fuel is liquid fluorides of U and Pu with Li, Be, Na and other fluorides
- 700–800C outlet temperature
- 1,000 MWe
- Low pressure (<0.5 MPa)

#### Benefits

- Waste minimization
- Avoids fuel development
- Proliferation resistance through low fissile material inventory



Поначалу GIF выбрал MSR в качестве самой инновационной концепции. Однако из всех шести реакторных систем на разработку MSR необходимы самые большие затраты, это уменьшает заинтересованность членов GIF в MSR. Данный проект оценивается как наиболее футуристический проект из коллекции *Четвертого поколения*.

Таким образом, среди отобранных систем три имеют быстрые нейтронные спектры: SFR, GFR и LFR.

Быстрые реакторы Поколения IV предполагают возможность сжигания всех актинидов, что значительно уменьшит отходы, и способны воспроизвести больше топлива, чем потребляют.

Первая версия SCWR будет тепловым реактором, за ней последует версия быстрого реактора.

Две продвинутые системы с газовым теплоносителем близко связаны: GFR – естественное продолжение VHTR, MSR – нетрадиционная система.

За исключением VHTR, все эти системы будут эксплуатироваться с замкнутым ядерным топливным циклом.

Все шесть реакторных концепций смогут производить водород. Термохимический процесс, в частности, применяется в четырех из них ввиду высоких температур теплоносителя на выходе, а именно в VHTR, GFR, LFR и MSR.

Некоторые основные характеристики базисных реакторных установок Поколения IV, создаваемых в рамках проекта GIF-IV, представлены в таблице.

Таблица – Основные характеристики базисных реакторных установок Поколения IV

Реакторная система	Спектр нейтронов	Теплоноситель	T, °C	Топливо	Топливный цикл	Мощность (МВт эл.)
Быстрые реакторы с натриевым теплоносителем (SFR)	быстрый	натрий	550	<sup>238</sup> U и MOX	замкнутый	150 1500
Высокотемпературные газовые реакторы (VHTR)	тепловой	гелий	1000	UO <sub>2</sub> призмы или шарики	открытый	275
Быстрые реакторы с газовым теплоносителем (GFR)	быстрый	гелий	850	<sup>238</sup> U	замкнутый	275
Сверхкритические реакторы с водным теплоносителем (SCWR)	тепловой или быстрый	вода	500	UO <sub>2</sub> или MOX	открытый (тепл.) или замкнутый (быстр.)	1700
Быстрые реакторы со свинцовым теплоносителем (LFR)	быстрый	Pb или Pb-Bi	480-800	<sup>238</sup> U	замкнутый	10-100 600
Жидкосольевые реакторы (MSR)	эпитепловой		700-800		замкнутый	1000

Кроме этого:

различные реакторы могут соединяться в симбиозных топливных циклах, включая комбинации из тепловых реакторов и реакторов на быстрых нейтронах;

актиниды из тепловых систем могут повторно использоваться в системах с быстрыми нейтронами, что приводит к сокращению запасов актинидов;

повышение степени выгорания в тепловых реакторах с газовым или водяным охлаждением также может способствовать утилизации актинидов в симбиозной системе;

тепловые системы могут выполнять и дополнительные функции, такие как производство водорода в высокотемпературных газоохлаждаемых реакторах или в экономичных легководных реакторах, что является одним из направлений общей стратегии по обеспечению более устойчивого будущего.



В результате объединения усилий в рамках международных программ по исследованиям ядерно-энергетических систем Поколения IV был получен ряд существенных инновационных достижений. Однако некоторые стратегические вопросы остаются открытыми, требующими дальнейших разработок, в том числе:

какова реалистическая шкала времени для развития инновационных ядерных систем;

какие технологические достижения нужны в период перехода от Поколения III к Поколению IV и для промышленного развертывания инновационных реакторов и топливных циклов;

какие социальные и политические проблемы могут замедлить внедрение новых технологий.

Согласно GIF, замкнутый топливный цикл является главным преимуществом конструкций реакторов четвертого поколения. При замкнутом топливном цикле происходит переработка отработавшего ядерного топлива и получение из него плутония, который затем используется в качестве топлива. Для широкого внедрения технологии замкнутого топливного цикла необходимо произвести пересмотр существующей промышленной политики в большинстве ядерных держав. Движение навстречу четвертому поколению реакторов с замкнутым топливным циклом потребует крупномасштабных инвестиций на строительство перерабатывающих заводов.

Для подготовки информационного бюллетеня использованы следующие источники:

1. Елагин Ю. П. Исследования реакторных систем поколения IV// Атомная техника за рубежом. – 2007, № 11. – С. 7-18.
2. Ван Готем Инновационные ядерные системы IV поколения. //Безопасность окружающей среды.- 2010.- № 3 .- С.28-35.
3. Бертран Баррэ, Пьер-Рене Боки // Атомная энергия: Понять будущее - М.:АНО «Центр содействия социально-экологическим инициативам атомной отрасли»-2011.- 204 С.
4. [www/gen-4.org/Technology/systems/index.htm](http://www/gen-4.org/Technology/systems/index.htm)

Материал подготовили: Брылева В.А., Войтецкая Е.Ф., Нарейко Л.М.

**Адреса для контактов:**

ГНУ «ОИЭЯИ-Сосны» НАН Беларуси, 220109, Минск, ул. академика А.К. Красина, 99  
тел.: 299-47-61, 299-45-56, факс: 299-43-55, E-mail: <http://www.sosny.bas-net.by>  
E-mail: [valentina.bryliova@yandex.by](mailto:valentina.bryliova@yandex.by)

Для получения данного информационного бюллетеня просим подать заявку в электронном виде с указанием своего электронного адреса

©При перепечатке ссылка обязательна

По заказу Министерства энергетики Республики Беларусь