

УДК 621.039

**ИННОВАЦИИ В АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКЕ  
INNOVATIONS IN NUCLEAR ENERGY**

Ю.С. Ровская, С.А. Лучина

Научный руководитель – В.В. Кравченко, к.э.н., доцент  
Белорусский национальный технический университет, г. Минск

Y. Rouskaya, S. Luchyna

Supervisor – V. Kravchenko, Candidate of Economic Sciences, Docent  
Belarusian national technical university, Minsk

**Аннотация:** данная статья приводит примеры инноваций в ядерной энергетике, которые помогут уменьшить вредное воздействие на экологию, увеличить эффективность производства, уменьшить риски и минимизировать издержки, а также увеличить выработку энергии.

**Abstract:** this article provides examples of innovations in nuclear energy that will help reduce the harmful effects on the environment, increase production efficiency, reduce risks and minimize costs, as well as increase energy production.

**Ключевые слова:** быстрый реактор, МОКС-топливо, термоядерный реактор, плавучая АЭС.

**Keywords:** fast reactor, MOX fuel, thermonuclear reactor, floating nuclear power plant.

**Введение**

В современном мире роль атомной энергетики возросла. Эта отрасль промышленности постоянно развивается. В мировой энергетической системе доля атомной энергетики равна 17%. Данная отрасль занимает третье место после угольной энергетики и гидроэнергетики. Это значительная часть мировой энергетики, и ожидается, что в ближайшие 10 лет использование ядерной энергии будет расти. Невысокая себестоимость атомной энергии и полное отсутствие выбросов парниковых газов и аэрозолей дает АЭС значительное преимущество перед другими видами электростанций. В этом докладе будут описаны последние инновации в атомной энергетике, которые позволили сделать огромный шаг к новым открытиям в этой отрасли и привели к ее значительному развитию.

**Основная часть**

Вот три причины, почему мир постепенно переходит к атомной энергии:

- Ядерная энергия не портит качество воздуха. Он генерирует энергию посредством ядерного деления, которое представляет собой процесс расщепления атомов урана с получением энергии, соответственно, никаких газов не выделяется.
- Атомная электростанция не занимает много места. Несмотря на производство большого количества безуглеродной энергии, ядерная энергетика производит больше электроэнергии на меньших площадях, чем любой другой источник чистого воздуха. Для работы типичной атомной электростанции мощностью 1000 мегаватт требуется чуть более

1 квадратной мили. По данным NEI, ветряным электростанциям требуется в триста шестьдесят раз больше места для выработки того же количества электроэнергии, в то время как солнечным фотоэлектрическим установкам требуется в 75 раз больше места.

- Ядерная энергетика производит минимальное количество отходов. Одна таблетка ядерного топлива имеет очень маленький размер и вес 4.5 грамма, но при этом производит 101 Дж тепловой энергии. Выгорание топлива в реакторе достигает 3500 МВт·сутки/т. Но в данное время запасы урана-235 невелики, и постоянно уменьшаются, в связи с его естественным распадом. При эксплуатации АЭС появляются ядерные отходы, и их число растет. Поэтому разрабатываются ядерные реакторы и атомные электростанции с замкнутым ядерным топливным циклом. Суть в том, чтобы перерабатывать ядерные отходы, извлекать из них плутоний-239 и использовать их в качестве ядерного топлива [1].

Недавно отработавшее ядерное топливо имеет высокий уровень радиоактивности, так как в нем присутствуют актиниды, такие как уран, плутоний, нептуний, америций, кюрий. Массовая доля плутония составляет примерно 1% от отработавшего топлива. Доли его изотопов примерно равны:  $Pu-241$  15%,  $Pu-239$  52%,  $Pu-242$  6%,  $Pu-240$  24%,  $Pu-238$  2%. Эти изотопы либо имеют способность дальше делиться, либо их можно превратить в делящиеся посредством трансмутации. При применении инновационного метода переработки ядерных отходов, используют метод химического разделения. С помощью данного метода плутоний и актиниды извлекаются из отработавшего ядерного топлива. Далее проводится трансмутация, во время которой сжигаются путем ядерного деления нептуний, плутоний, америций и кюрий. Для данной радиохимической переработки используют реакторы типа ВВЭР-440 или реакторы на быстрых нейтронах [1].

И в результате остается плутоний и уран, которые можно использовать для производства смешанного топлива. Экстрагирование данных элементов позволяет снизить необходимость в уране до 30%. Также это позволяет существенно уменьшить количество ядерных отходов и сделать их менее радиоактивными в долгосрочной перспективе. В данное время существует несколько разновидностей смешанного топлива, которое может быть произведено из переработанных материалов: МОКС-топливо, SNUP-топливо. МОКС-топливо - это ядерное топливо на основе двух компонентов: оксида урана 235 и оксида плутония 239. Доля оксида плутония-239 в МОКС-топливе примерно составляет от 1,5 до 25–30%. Также можно использовать оружейный плутоний для изготовления МОКС-топлива. В тепловых реакторах достигается 30% выгорание плутония из МОКС-топлива. А в быстрых реакторах это значение намного больше, потому что быстрые нейтроны реагируют с ураном-238. Французский реактор «Феникс» самым первым, в 1970-е годы, начал работать полностью на МОКС-топливе. В Китае в 2011 году запустили экспериментальный быстрый реактор CEFR. Сейчас строится демонстрационный блок с CFR-600, который должен запуститься в 2023 году. В России полностью на МОКС-топливе работает реактор БН-800. Реакторы на быстрых нейтронах были созданы с целью замены обычных реакторов, а также для уменьшения количества

радиоактивных отходов и для создания замкнутого ядерного топливного цикла – почти безотходного производства. Первым реактором на быстрых нейтронах был советский исследовательский БОР-60, который работает по сей день [2].

На Белоярской АЭС с 1980 года эксплуатируется быстрый реактор БН-600. Основная загрузка реактора состоит из оксида урана с обогащением 17, 21 или 26%, и небольшого количества МОКС-топлива. В корпусе реактора, помимо активной зоны, находятся главные циркуляционные насосы ГЦН и промежуточные теплообменники ПТО. Этот реактор трехконтурный. В первых двух контурах теплоносителем выступает натрий. Давление теплоносителя в корпусе примерно равно атмосферному и превышает его всего на 0,05 МПа, поэтому опасность разрыва корпуса исключается. Также это упрощает выбор материалов и сборку корпуса [2].

Реактор БН-800 базируется на проверенных технологиях реактора БН-600, с добавлением новых технологий. Вот некоторые из них: автономная технология аварийной защиты в виде гидравлически взвешенных стержней СУЗ, которые реагируют на снижение расхода натрия, пассивные системы аварийного расхолаживания, под активной зоной построена «ловушка расплава», улучшена защита от сейсмической активности. Этот реактор с 2022 года работает полностью на МОКС-топливе.

Главная инновация будущего – термоядерный синтез. Он позволит получать намного большее количество энергии, чем обычные ядерные реакторы. За последние 50 лет было проведено много экспериментов с термоядерными реакциями. За это время в мире было построено примерно 30 токамаков, в данный момент работает 60. Для увеличения мощности в таких реакторах исследователи работают над оптимизацией состояния плазмы через изменение плотности, температуры и времени удержания.

Некоторые из этих улучшений стали возможны благодаря увеличению размеров экспериментальных термоядерных установок. В течении десяти лет строится и собирается инновационный термоядерный реактор ИТЭР. Размер ИТЭР в два раза превосходит размер JET. Следовательно, объем плазмы в ИТЭР больше в десять раз. Использование инновационных конструкций и материалов дает возможность оборудовать ИТЭР самыми мощными устройствами для нагрева плазмы. Одно из них – гиротрон мощностью 1 МВт. На ИТЭР всего из 50 МВт тепловой энергии, затрачиваемой на нагрев плазмы, будет производиться в 10 раз больше термоядерной энергии – 500 МВт. Максимальная производительность ИТЭР будет огромной, но она будет реализована на небольшие промежутки времени – 5–10 минут. Для обеспечения постоянной подачи электроэнергии, будущие термоядерные электростанции должны работать непрерывно [3].

Одна из главных целей ИТЭР – доказать, что управляемый термоядерный синтез возможен. И что результатом термоядерной реакции служит выделение большего количества энергии, чем затраченного. Сначала энергия расходуется на разогрев плазмы. Потом, благодаря термоядерному синтезу, энергия выделяется в большем количестве: с одной реакции синтеза дейтерия с тритием выделяется 17,6 МэВ [3]. В таких термоядерных реакторах применяются системы нагрева в виде разрядов тока, лазеров и гиротронов. А также мощных магнитов для удержания

плазмы и недопущение ее соприкосновения со стенками токамака, чтобы она оставалась горячей и происходила термоядерная реакция.

Главным показателем эффективности реактора есть коэффициент усиления термоядерной энергии. Он представляет отношение произведенной термоядерной энергии к затраченной на разогрев плазмы энергии. Этот коэффициент обозначается символом « $Q$ ». На данный момент наибольший коэффициент равен 0,67, достигнутый на JET. Однако, чтобы добиться самопроизвольной и долговременной термоядерной реакции, коэффициент  $Q$  должен быть равен пяти.

Плавучая атомная станция – новый необычный проект, который позволяет обеспечивать энергией и теплом отдаленные районы, где невозможно установить атомную станцию. Ее преимущество в том, что она мобильная, и может перемещаться в разные регионы, например для обеспечения энергией Антарктиду, где проводятся разные исследования. В 2020 году введена в эксплуатацию российская ПЭБ «Академик Ломоносов», оснащенная двумя водо-водяными реакторами КЛТ-40С. Вместе они подают на берег 70 МВт электроэнергии и до 50 Гкал/ч тепловой энергии. Полная электрическая мощность составляет 76 МВт. Максимальная тепловая мощность, которую возможно подать, примерно равна 146 Гкал/ч. А электрическая мощность в этот момент составляет порядка 44 МВт. Электроэнергией и теплом, вырабатываемой этой плавучей АЭС, одновременно можно обеспечить около 100 000 человек [4].

### **Заключение**

Благодаря инновациям атомная энергетика развивается с каждым днем, и в будущем мир полностью перейдет на данный источник энергии, так как он очень эффективный и быстро окупается, также не принося сильного вреда окружающей среде. Примеры, приведенные в данном докладе, сподвигнут к появлению новых проектов и инноваций, позволяющих сделать прорыв в данной отрасли.

### **Литература**

1. Ядерные инновации [Электронный ресурс] / Атомная энергетика. – Режим доступа: <https://www.iaea.org/sites/default/files/23-03627rbulletinseptweb.pdf> /. – Дата доступа: 15.10.2023.
2. Реакторы на быстрых нейтронах [Электронный ресурс] / Атомная энергетика. – Режим доступа: <https://www.ippe.ru/nuclear-power/fast-neutron-reactors/> /. – Дата доступа: 16.10.2023.
3. ИТЭР – крупнейший в мире эксперимент по термоядерному синтезу [Электронный ресурс] / Атомная энергетика. – Режим доступа: <https://www.iaea.org/ru/energiya-termoyadernogo-sinteza/iter-krupneyshiy-v-mire-eksperiment-po-termoyadernomu-sintezu/> /. – Дата доступа: 16.10.2023.
4. Плавучая АЭС [Электронный ресурс] / Атомная энергетика. – Режим доступа: [https://www.rosenergoatom.ru/stations\\_projects/sayt-pates/](https://www.rosenergoatom.ru/stations_projects/sayt-pates/) /. – Дата доступа: 15.10.2023.