

УДК 621.311.25

Основные направления развития ядерных реакторов АЭС

Хоронко В.А.

Научный руководитель – к.т.н., доцент ЧИЖ В.А.

История ядерной энергетики охватывает период более полувека, и за это время она уже стала традиционной отраслью энергетики. В настоящее время 31 страна эксплуатирует атомные электростанции. По состоянию на 2016 год в мире насчитывалось 449 энергетических реакторов (включая остановленные на длительный срок) общей мощностью 391770 МВт, 60 реакторов находятся в стадии сооружения. В основном все реакторы на данный момент на водном носителе.

В настоящее время атомная энергетика активно развивается, об этом может свидетельствовать строительство Белоярской АЭС с реактором БН-1200 (реактор на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем).

Реакторы на быстрых нейтронах, как считается, имеют два главных преимущества. Первый большой плюс связан с решением сырьевой проблемы нынешней атомной энергетики.

Реакторы на быстрых нейтронах способны нарабатывать топливо сами себе. Причем, полученный плутоний можно использовать бесконечное количество раз – нужна лишь небольшая добавка. Кроме этого, БН может работать на компонентах отработанного ядерного топлива традиционных АЭС: то, что раньше было радиоактивным "мусором", после доработки снова идет в дело. Быстрые реакторы и электроэнергию вырабатывают, и топливо воспроизводят. В них при делении ядер ядерного топлива образуется избыток новых ядер, способных к делению. Идея замыкания топливного цикла, о которой в мире мечтают на протяжении десятилетий, становится реальностью.

Второе достоинство "быстрых" реакторов – их способность эффективно "сжигать" наиболее опасные долгоживущие радионуклиды, образующиеся в отработавшем ядерном топливе.

Таким образом, можно радикально решить проблему обезвреживания радиоактивных отходов атомной энергетики, многократно уменьшив их объем.

Именно благодаря этим двум главным преимуществам специалисты называют реакторы на быстрых нейтронах завтрашним днем атомной энергетики, которая благодаря замкнутому ядерному топливному циклу будет и обеспечивать себя воспроизводимым ядерным "горючим", и решит многие экологические вопросы. Идея создания реакторов на быстрых нейтронах для атомной энергетики возникла еще на ее заре, в конце 1940-х годов. Но строить "быстрые" реакторы оказалось не так просто из-за технических сложностей. В частности, в таких установках теплоноситель, "отбирающий" тепло от ядерного топлива, не должен замедлять быстрые нейтроны, иначе теряется сам смысл этих реакторов

Воду в быстром реакторе использовать нельзя – она чрезвычайно эффективно замедляет нейтроны. Чем её можно заменить?

Газы: Можно охлаждать реактор гелием. Но из-за небольшой теплоемкости – мощные реакторы охладить таким образом сложно.

Жидкие металлы: Натрий, калий – широко используются в быстрых реакторах по всему миру. Из плюсов – низкая температура плавления и работа при около-атмосферном давлении, но эти металлы очень хорошо горят и реагируют с водой. Единственный в мире действующий энергетический реактор БН-600 – работает именно на натриевом теплоносителе.

Свинец, висмут – используются в разрабатываемых сейчас в России реакторов БРЕСТ и СВБР. Из очевидных минусов – если реактор охладился ниже температуры замерзания свинца/висмута – разогреть его очень сложно и долго.

Ртуть – с ртутным теплоносителем был реактор БР-2, но как оказалось, ртуть относительно быстро растворяет конструкционные материалы реактора – так что больше ртутные реакторы не строили.

Экзотика: Отдельная категория – реакторы на расплавленных солях – LFTR – работают на разных вариантах фторидов делящихся материалов (урана, тория, плутония). 2 «лабораторных» реактора были построены в США в Oak Ridge National Laboratory в 60-х годах, и с тех времен других реакторов пока реализовано не было, хотя проектов много.

Первый в мире энергоблок с реактором на быстрых нейтронах БН-350 установленной электрической мощностью 350 МВт был запущен в 1973 году на восточном побережье Каспийского моря в городе Шевченко (ныне Актау, Казахстан).

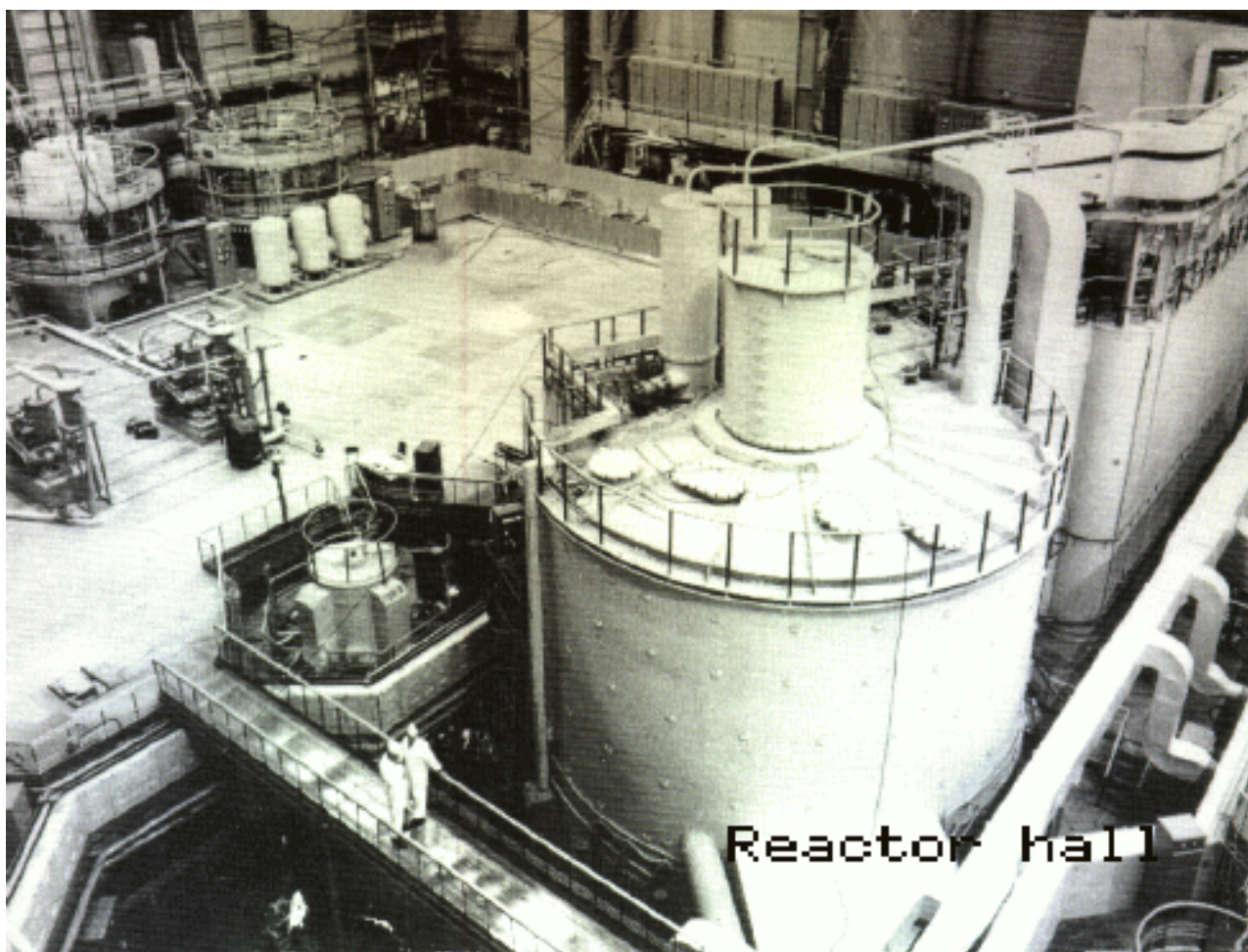


Рисунок 1 – Реактор БН-350

Надо отметить, что аббревиатура БН означает не "быстрые нейтроны", а "быстрый натриевый" – тем самым подчеркивается, что в качестве теплоносителя в таких реакторах используется жидкий натрий.

А в 1980 году на Белоярской АЭС имени Курчатова был запущен БН-600 установленной электрической мощностью 600 МВт, он надежно работает по сей день. Четвертый энергоблок БН-800 Белоярской АЭС был пущен в 2014 году, а первый ток он дал в декабре 2015 года. На этом энергоблоке будет отрабатываться ряд технологий для замыкания ядерного топливного цикла. БН-800 рассчитан на использование в нем смешанного оксидного уран-плутониевого МОКС-топлива, в котором можно использовать плутоний, выделенный в процессе переработки отработавшего ядерного топлива реакторов на тепловых нейтронах.



Рисунок 2 – Макет реактора БН-800 (производит больше топлива, чем потребляет)

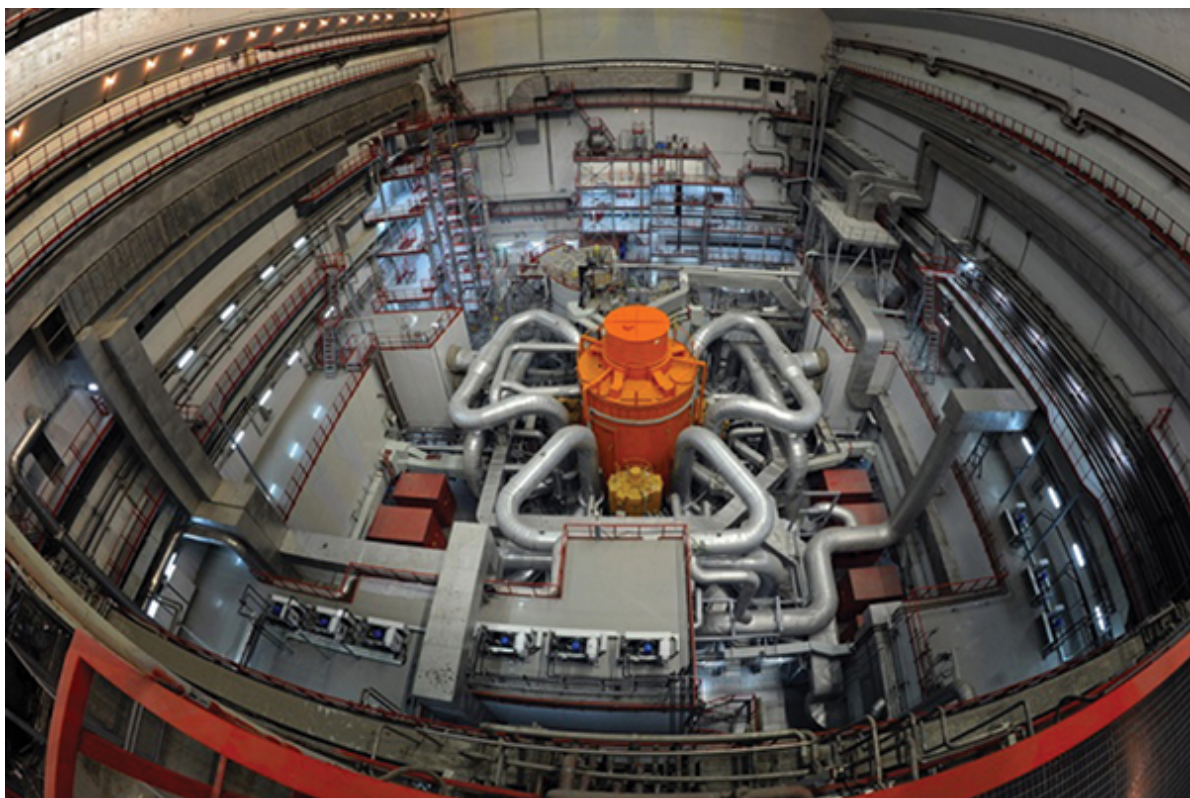


Рисунок 3 – Реактор БН-800

Работа над проектом энергоблока БН-1200 – одна из составляющих выполняемого "Росатомом" проекта "Прорыв" – одного из главных современных мировых проектов в атомной энергетике, в рамках которого предусматривается создание ядерных энергетических технологий нового поколения на базе замкнутого ядерного топливного цикла с использованием реакторов на быстрых нейтронах.

Интересно, что история мировой атомной энергетике началась именно с реактора на быстрых нейтронах. 20 декабря 1951 года в Айдахо заработал первый в мире энергетический реактор на быстрых нейтронах EBR-I (Experimental Breeder Reactor) электрической мощностью всего 0,2 МВт.



Рисунок 4 – Реактор EBR-I

Позднее, в 1963 году, недалеко от Детройта была запущена АЭС с реактором на быстрых нейтронах Fermi – уже мощностью около 100 МВт (в 1966 году там произошла серьезная авария с расплавлением части активной зоны, но без каких-либо последствий для окружающей среды или людей).

В СССР этой темой с конца 1940-х годов занимался Александр Лейпунский, под руководством которого в Обнинском физико-энергетическом институте (ФЭИ) были разработаны основы теории быстрых реакторов и построены несколько экспериментальных стендов, что позволило изучить физику процесса. В результате проведенных исследований в 1973 году вступила в строй первая советская АЭС на быстрых нейтронах в городе Шевченко (ныне Актау, Казахстан) с реактором БН-350 (изначально обозначался БН-250). Она не только вырабатывала электроэнергию, но и использовала тепло для опреснения воды. Вскоре были запущены французская АЭС с быстрым реактором Phenix (1973) и британская с PFR (1974), обе мощностью 250 МВт.

Однако в 1970-х в атомной энергетике стали доминировать реакторы на тепловых нейтронах. Обусловлено это было различными причинами. Например, тем, что быстрые

реакторы могут вырабатывать плутоний, а значит, это может привести к нарушению закона о нераспространении ядерного оружия. Однако скорее всего основным фактором было то, что тепловые реакторы были более простыми и дешевыми, их конструкция отработывалась на военных реакторах для подводных лодок, да и сам уран был очень дешев.

Быстрые реакторы – обладают основным преимуществом, которого все ждут от термоядерных – топлива для них человечеству хватит на тысячи и десятки тысяч лет. Его даже добывать не нужно – оно уже добыто, и лежит на складах и отвалах. Технические проблемы – хоть и остаются, но выглядят решаемыми, а не эпическими – как в случае термоядерных реакторов.

Топливо в «замкнутом топливном цикле» появляется не из воздуха, а из бесполезного до этого урана-238 и тория после облучения в быстром реакторе, и дальнейшей химической переработки чтобы из отработанного топлива выделить полезные плутоний-239 и уран-233. С экономической точки зрения — при массовом строительстве быстрые реакторы хоть и дороже обычных тепловых ядерных реакторов, но не на порядки.

Литература

1. <https://ria.ru/atomtec/20170626/1497267674.html>
2. <https://www.kp.by/daily/26699/3724210/>
3. <https://geektimes.ru/post/180717/>
4. <https://www.popmech.ru/science/9816-ballada-o-bystrykh-neytronakh-unikalnyy-reaktor-beloyarskoy-aes/>