

СТАТЬИ

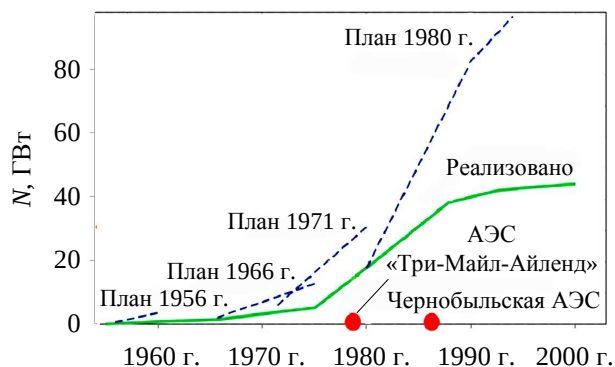
УДК 621.039

К СТРАТЕГИИ РАЗВИТИЯ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ РОССИИ

Алексеев П.Н., Гагаринский А.Ю., Калугин М.А., Кухаркин Н.Е., Семченков Ю.М., Сидоренко В.А.,
Субботин С.А., Теплов П.С., Фомиченко П.А. (НИЦ «Курчатовский ин-т», г. Москва),
Асмолов В.Г. (Госкорпорация «Росатом», г. Москва)
e-mail: agagarin@kiaie.ru

Принципиальным изменением стратегических вариантов развития ядерной энергетики страны за последние годы была корректировка в сторону существенного снижения потребностей в производстве электроэнергии и соответственно мощности на прогнозируемый период [1—3]. Если ранее в качестве таких ориентиров рассматривалась установленная электрическая мощность АЭС, ГВт: 55—62 в 2030 г. [1, 2], 150—230 [1] и 180—200 [2] в 2050 г., 350—400 к концу XXI в. [2], то в настоящее время она оценивается 40—45 ГВт к 2050 г. и 70—90 ГВт к 2100 г. Завышенные ожидания ядерно-энергетического развития не являются новой тенденцией. Различие планов и их реализация сохраняются еще с советского периода становления ядерной энергетики (рис. 1).

Достижением прошедшего периода развития стратегических исследований следует считать установление согласия как в научном сообществе, так и в руководстве отрасли относительно базовых положений стратегии ядерно-энергетического развития до середины XXI в.:



Р и с. 1. Установленная мощность АЭС в СССР и СНГ

ключевым направлением является переход к двухкомпонентной структуре на базе тепловых и быстрых реакторов с замыканием топливного цикла. Синергетический принцип развития обоих компонентов позволит в перспективе достичь существенного системного и экономического эффекта;

технологической основой двухкомпонентной ядерно-энергетической системы являются действующие и создаваемые ВВЭР и промышленно освоенные быстрые реакторы. Следует добавить, что в экспертной среде также согласован «лист ожидания» перспективных реакторных технологий:

быстрые реакторы с тяжелым жидкометаллическим теплоносителем;

высокотемпературные газоохлаждаемые реакторы для производства энергии, водорода и замещения органического топлива в энергоемких отраслях промышленности;

внедрение тория в ядерный топливный цикл;

использование расплавов солей в качестве реакторного топлива и базовой среды для переработки ядерного топлива;

термоядерный источник нейтронов для наработки ядерного топлива.

Оценки 2018 г. были сфокусированы на уточнении целевых задач по созданию инновационного ВВЭР и развитию направления АЭС с быстрыми реакторами, а также расчетно-аналитическом обосновании вариантов стратегии развития, комплексном сравнительном анализе сценариев, основанных на перспективных технологиях реакторов. Техническое задание на эти исследования и исходные данные к ним были подготовлены рабочей группой, в которую вхо-

дили эксперты Госкорпорации «Росатом», АО «Концерн Росэнергоатом», АО «ГНЦ РФ — ФЭИ», АО «ОКБМ Африкантов», АО ОКБ «Гидропресс», АО «ВНИИАЭС», РФЯЦ — ВНИИТФ, АО «НИКИЭТ» и НИЦ «Курчатовский институт».

Целевые задачи развития реакторных технологий. Программа развития ВВЭР опирается на опыт эксплуатации и направлена на решение ключевых системных проблем ядерной энергетики, повышение конкурентоспособности и снижение рисков, связанных с развитием альтернативных технологий, возможность эффективной работы в двухкомпонентной ядерно-энергетической системе с замкнутым ЯТЦ. В основе рассматриваемых технических проектов лежат эволюционные и инновационные технологические решения, позволяющие обеспечить плавный переход к формированию двухкомпонентной ядерной энергетики с тепловыми и быстрыми реакторами.

В качестве основных на роль перспективных технологий легководных реакторов рассматриваются ВВЭР-ТОИ, усовершенствованные ВВЭР со спектральным регулированием, инновационные ВВЭР со сверхкритическими параметрами теплоносителя. Ближайшей целевой задачей является внедрение усовершенствованного для целей рыночной привлекательности блока ВВЭР-ТОИ электрической мощностью 1255 МВт в 2021—2025 гг. Проект предусматривает модернизацию конструкции блоков АЭС-2006 на основе опыта, полученного при эксплуатации серийных ВВЭР, строительство ВВЭР-ТОИ на головной площадке Курской АЭС-2. Предполагается разработка ВВЭР большой мощности с новой компоновкой реакторной установки для улучшения экономических показателей (двух- и трехпетлевые установки). Далее следует реализация механизма спектрального регулирования в реакторе, который должен обеспечить коэффициент накопления (отношение количества делящихся ядер в выгружаемом и загружаемом топливе) 0,7—0,8 в замкнутом топливном цикле и расход природного урана в открытом топливном цикле менее 130 т урана на 1 ГВт электрической мощности в год.

Спектральное регулирование при выгорании топлива предлагается реализовать путем изменения водно-уранового отношения. В этом случае возможен полный отказ от жидкостного

борного регулирования в нормальных режимах работы, что позволит сократить количество жидких отходов до 50% и уменьшить сброс трития в окружающую среду до 10 раз. Оптимизация топливоиспользования достигается за счет комплексного эффекта, связанного с сокращением паразитного захвата нейтронов в активной зоне, и изменения спектральных условий в процессе работы реактора на мощности. Спектральное регулирование для урановых загрузок позволяет на 30% сократить расход природного урана и объем работ разделения в сравнении с 18-месячным топливным циклом ВВЭР-ТОИ, а также обеспечивает возможность работы реактора со 100%-ной загрузкой смешанным уран-плутониевым топливом.

ВВЭР со спектральным регулированием — это эволюционный водо-водяной корпусной энергетический реактор, опирающийся на созданную и надежно работающую базу. В условиях ограниченных запасов природного урана с учетом ожидаемых объемов отработавшего топлива как от отечественных, так и зарубежных АЭС и доступного количества плутония его можно сразу загружать смешанным топливом. Параллельно с разработкой этого проекта необходимо создавать недостающие элементы замкнутого ЯТЦ, включая производство свежего и переработку отработавшего таблеточного смешанного топлива. ВВЭР со спектральным регулированием предлагается использовать на этапе перехода к замкнутому ЯТЦ для своевременного пуска его инфраструктуры.

Следующий шаг в развитии ВВЭР на долгосрочную перспективу — переход к сверхкритическому давлению теплоносителя (ВВЭР-СКД). Предполагается развитие данного направления в рамках международного сотрудничества в проекте «Поколение IV» (сроки реализации после 2045 г.).

Быстрые реакторы с натриевым теплоносителем являются промышленно освоенной технологией. Ее дальнейшим подтверждением должны стать надежная работа БН-800 с полной загрузкой активной зоны смешанным уран-плутониевым топливом и сооружение головного энергоблока на базе БН-1200 после доработки проекта. Основная цель доработки БН-1200 состоит в обеспечении высоких показателей конкурентоспособности технологии, способной эффективно работать как на начальном этапе

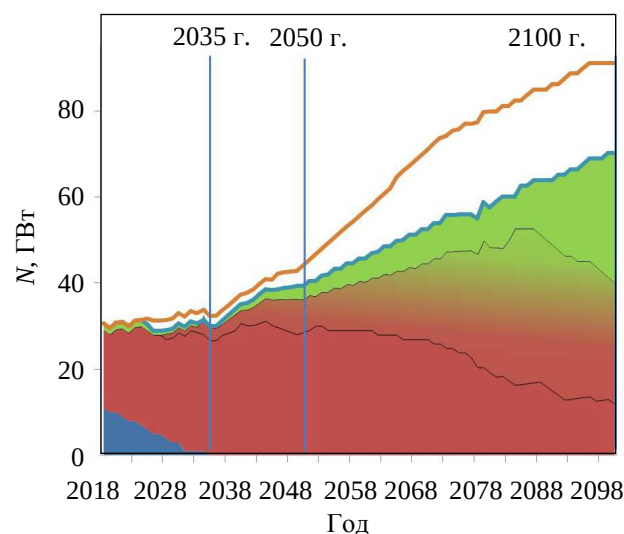
формирования многокомпонентной системы ядерной энергетики с тепловыми и быстрыми реакторами, так и в долгосрочной перспективе. В настоящее время разработан проект энергоблока с БН-1200 с к.п.д. производства электроэнергии более 43%, стремлением к обеспечению режима маневрирования с 50%-ной разгрузкой, использованием в составе загружаемого топлива накопленного обедненного урана при исключении потребности в природном уране, схемами топливообеспечения, направленными на сокращение объема отработавшего топлива в системе ядерной энергетики, а также эффективным использованием энергетического потенциала плутония любого изотопного состава и актиноидов. Применение в проекте БН-1200 новых технических решений наряду с реализованными в действующих БН-600, -800 обеспечило возможность существенного улучшения основных технических характеристик энергоблока и значительного повышения уровня безопасности. Новые технические решения должны быть обоснованы в ходе дальнейших расчетных и экспериментальных НИОКР.

На сегодняшнем этапе развития сохраняется вывод, что в результате 50-летнего опыта разработки натриевые быстрые реакторы подготовлены для практической реализации [3, 4]. Альтернативным направлением является разработка проекта быстрого реактора со свинцовым теплоносителем. Этапы его внедрения предусматривают завершение НИОКР, сооружение опытно-демонстрационного блока и получение опыта эксплуатации и технических показателей.

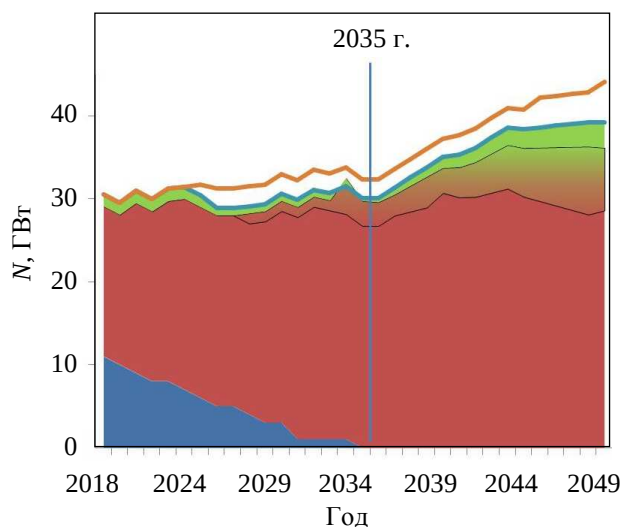
Анализ сценариев развития ядерной энергетики. Выполненное в 2018 г. расчетно-аналитическое обоснование концепции двухкомпонентной ядерно-энергетической системы с замкнутым топливным циклом опиралось на исходные данные спроса на электроэнергию в соответствии с генеральной схемой размещения объектов электроэнергетики до 2035 г. Базовый сценарий исходил из положений, заложенных при формировании генеральной схемы размещения объектов электроэнергетики до 2035 г., утвержденной в 2017 г. Второй сценарий, получивший название базовый', был скорректирован с учетом текущих прогнозов на спрос электроэнергии и согласованных изменений по вводу-выводу энергоблоков АЭС до 2035 г. В соот-

ветствии с базовым сценарием предполагается достижение установленной мощности, ГВт: 33 к 2035 г., 44 к 2050 г. и 92 к 2100 г. Скорректированный сценарий базовый' предполагает установленную мощность 30, 39 и 71 ГВт соответственно. Расчетные исследования базировались на проведенном ранее обосновании предложенных разработчиками основных характеристик рассматриваемых проектов, планах НИОКР и экспертных оценках сроков и перспектив внедрения новых технологий.

Следует отметить, что результаты в виде принципиальной схемы развития ядерной энергетики России в первой половине XXI в. показывают возможность реализовать заявленную стратегию на основе созданного технологического базиса при приемлемой для такого временного горизонта прогнозирования неопределенности в структуре по типам реакторов (рис. 2). Однако при прогнозировании на 80 лет неопределенность структуры ядерной энергетики обнаруживает столь сильную зависимость от исходных данных, что требует дополнительного анализа постановки задачи (рис. 3). В то же время рассмотрение более широкого интервала прогнозирования с учетом второй половины XXI в. может быть полезным для оценки рисков долгосрочного развития ядерной энергетики, организации планирования НИОКР в области технологий и путей снижения рисков.



Р и с. 2. Быстрые реакторы (■), ВВЭР (■), РБМК (■), зона неопределенности (■), сценарий базовый' (—) и базовый (—)



Р и с. 3. Быстрые реакторы (■), ВВЭР (■), РБМК (■), зона неопределенности (■), сценарий базовый (■) и базовый (■)

Очевидно, что решение о внедрении новых реакторных технологий должно приниматься на основе анализа текущего уровня их готовности, соответствия прогнозируемых характеристик системным требованиям и, что принципиально важно, подтверждения достоверности заявленных технико-экономических показателей.

Неопределенность ресурсной базы. В качестве ее источника принято использовать данные о ресурсах природного урана OECD/NEA, которые базируются на информации, предоставляемой странами-участницами [5].

Как видно в табл. 1, при некоторых, иногда значительных и, по-видимому, конъюнктурных колебаниях в заявленных ресурсах достоверные запасы составляют 500—650 тыс. т в зависимости от стоимости и полноты извлечения, включение в рассмотрение прогнозных ресурсов увеличивает общие запасы примерно до 750—800 тыс. т. В то же время в расчетных оценках

вариантов долгосрочного развития ядерной энергетики России лежит консервативное предположение о внутренних запасах природного урана на уровне ~500 тыс. т, по-видимому, связанное с попыткой разделить внутренние и внешние обязательства по поставкам топлива. Оно снижает допустимую долю ВВЭР в двухкомпонентной ядерно-энергетической системе к 2100 г. В то же время дополнительный учет прогнозных ресурсов природного урана и возможностей оптимизации характеристик ВВЭР для эффективной работы в замкнутом ЯТЦ допускает сохранение значительной доли ВВЭР в ядерно-энергетической системе к концу XXI в.

Как было отмечено, уже в экспертной оценке 2008 г. [6] риски, связанные с возможным сокращением ввода быстрых реакторов в прогнозируемом объеме, могут компенсироваться увеличением ресурсной базы урана за счет внутренних действий или закупок на внешнем рынке. Ресурсная база не может быть зафиксирована на многие десятилетия. Этот фактор должен рассматриваться как переменная величина в одном ряду с развитием реакторных технологий и замыканием ядерного топливного цикла.

Неопределенность технико-экономических показателей. Сопоставление оптимального интегрального параметра — удельной приведенной стоимости электроэнергии, предлагаемое в качестве критерия оценки реакторных технологий, показывает конкурентоспособность ядерной в сравнении с альтернативными способами производства (табл. 2). Для сравнения используется удельная приведенная стоимость для парогазовой установки 2100—2500 руб./(МВт·ч). Данный показатель не является ключевым при принятии решений, но предлагается в качестве критерия приемлемости для выбора новых технологических направлений.

Таблица 1. Ресурсы урана России, тыс. т

Категория ресурсов	Стоимость извлечения, дол./кг	Год				
		2009	2011	2013	2015	2017
Достоверные*	<130	480,3	487,2	505,9	507,8	485,6
	<260	566,3	650,3	689,2	695,2	656,9
Прогнозные**	<260	182	191,8	112	126,3	143,9
Суммарные	<260	748,3	842,1	801,2	821,5	800,8

*Полученные прямым измерением в известных месторождениях.
 **Ожидаемые в известных геологических провинциях.

Таблица 2. Удельная приведенная стоимость электроэнергии разных энергоблоков, руб./(МВт·ч)

Энергоблок	Оптимальная	С учетом рисков
ВВЭР-ТОИ	1882	2205
ВВЭР-С	1750	2125
БН-1200М	1770	2088
БРЕСТ-1200	1683	2093

Очевидно, что имеет смысл сопоставлять только те технологии, которые находятся на одном технологическом уровне готовности. Можно отметить в этой связи историческое заявление Х. Риквера в Конгрессе США в 1953 г.: «Академический (в современной терминологии «бумажный» — прим. авторов) реактор практически всегда имеет следующие характеристики: (1) он прост; (2) он мал; (3) он дешев...» [7].

Очевидно, что одним из ключевых рисков долгосрочного развития ядерной энергетики является недостижение заявленных параметров по стоимости сооружения для новых блоков. Оценка варианта развития технологии быстрых реакторов со стоимостью сооружения АЭС с БН-1200, на 20% превышающей заявленные для ВВЭР показатели с переходом на ВВЭР-С, показывает возможность роста доли тепловых реакторов в системе к концу XXI в. с 1 до 80%.

Попытки сопоставления экономических характеристик реакторных технологий, находящихся на стадиях, с одной стороны, действующих АЭС, с другой, нереализованных проектов, представляют, по существу, лишь демонстрацию пределов оптимизма разработчиков и должны иметь соответствующий вес при принятии решений.

Таким образом, исследования 2018 г. еще раз подтверждают, что попытка представить в деталях структуру ядерно-энергетической системы во второй половине XXI в. не приводит к

однозначным результатам, дающим веские основания для стратегических решений в настоящее время. Представляется, что дальнейшая разработка стратегии должна быть сосредоточена на временных горизонтах технологических развилки принятия ключевых решений о внедрении новых реакторных технологий. В этой связи в долговременной стратегии не должны исключаться из рассмотрения инновационные идеи, по которым в настоящее время недостаточно объективных данных для определения их развития. К их числу в первую очередь относятся жидкосольевые реакторы-трансмутаторы долгоживущих радиоактивных отходов и термоядерные источники нейтронов для производства ядерного топлива.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеев П.Н., Асмолов В.Г., Гагаринский А.Ю. и др. Стратегия развития ядерной энергетики России до 2050 г. — Атомная энергия, 2011, т. 111, вып. 4, с. 183—196.
2. Адамов Е.О., Джалавян А.В., Лопаткин А.В. и др. Концептуальные положения стратегии развития ядерной энергетики России в перспективе до 2100 г. — Там же, 2012, т. 112, вып. 6, с. 319—331.
3. Алексеев П.Н., Гагаринский А.Ю., Кухаркин Н.Е. и др. Стратегический взгляд на ядерную энергетику России на современном этапе. — Там же, 2017, т. 122, вып. 3, с. 123—127.
4. Клинов Д.А., Гулевич А.В., Каграманян В.С. и др. Вызовы и стимулы развития быстрых натриевых реакторов в современных условиях. — Там же, 2018, т. 125, вып. 5, с. 131—136.
5. Uranium 2018: Resources, Production and Demand. NEA, OECD, IAEA, № 7413, 2018.
6. Ядерная энергия. Экспертные оценки развития. Курчатовский институт, 1949—2008 годы. М.: ИздАт, 2008, с. 111—207.
7. Rickover H. Testimony before congress. — In: AEC Authorizing Legislation: Hearings before the Joint Committee on Atomic Energy, 1970, p. 1702.

Поступила в Редакцию 25.02.18