

Международная научно-практическая конференция
«Международная конференция молодых специалистов,
ученых и аспирантов по физике ядерных реакторов»
3-7 сентября 2018 года

*Некоторые потенциальные возможности, проблемы и
парадоксы развития ЯЭ*

*Субботин Станислав Анатольевич
НИЦ «Курчатовский институт»*

Мировая ядерная энергетика в 2016 году

СОСТОЯНИЕ:

449 действующих блоков АЭС (в 2015 г. – 441 блок) суммарной установленной мощностью 392 ГВт(э) (растет с 2011 г.)

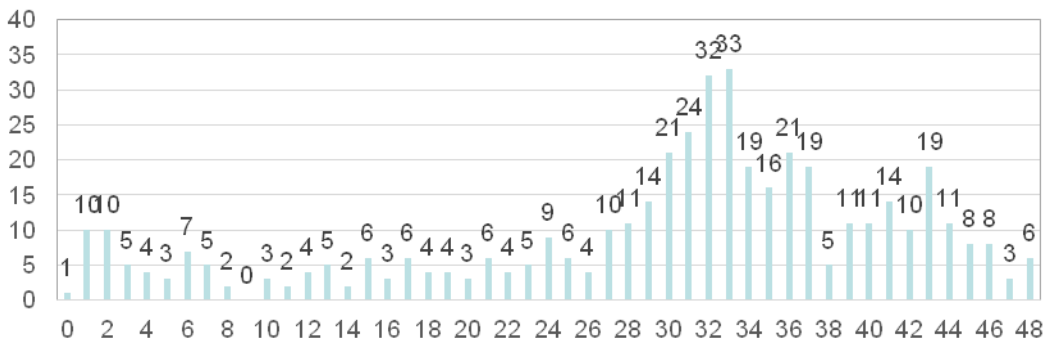
60 блоков строятся в **15** странах.

СОБЫТИЯ:

10 ядерных энергоблоков подключены к сети: **5** – в Китае, по **одному** – в Южной Корее, Индии, Пакистане, США и России.

Начато строительство **3** ядерных энергоблоков: **2** – в Китае, **один** – в ОАЭ.

Окончательно остановлены **3** ядерных энергоблока: по **одному** – в России, США и Японии (в 2015 году – 7 в Германии, Великобритании и Японии).



Мировая ядерная энергетика в 2017 году

СОСТОЯНИЕ:

448 действующих блоков АЭС (в 2016 г. – 450 блоков)
суммарной установленной мощностью **391,7 ГВт(э)** (в 2016 г. – 392,0).

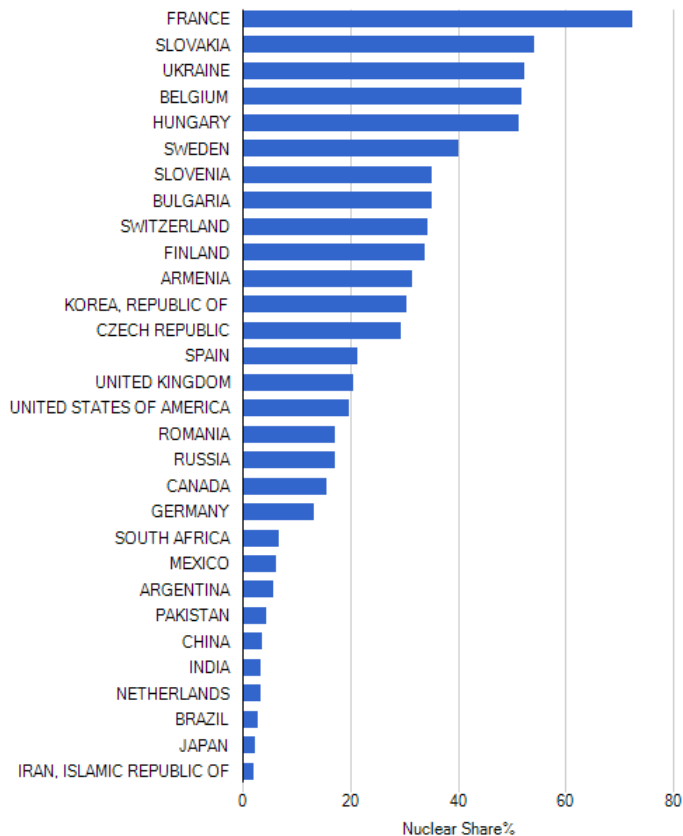
Строится **59** блоков (в 2016 г. – 61).

СОБЫТИЯ:

3 ядерных энергоблока
подключены к сети:
2 – в Китае, **1** – в Пакистане.

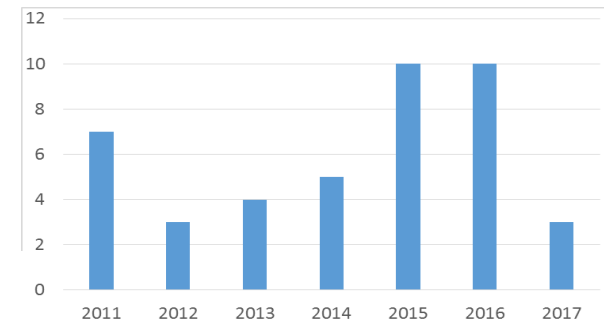
Начато строительство трех
ядерных энергоблоков: в
Южной Корее, Индии и
Бангладеш.

Окончательно остановлены
4 ядерных энергоблока: в
Южной Корее, Швеции,
Испании и Японии (в 2016 г.
– 2)

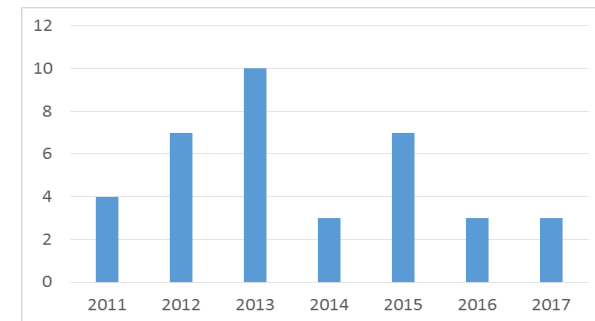


Ядерная доля в электрогенерации

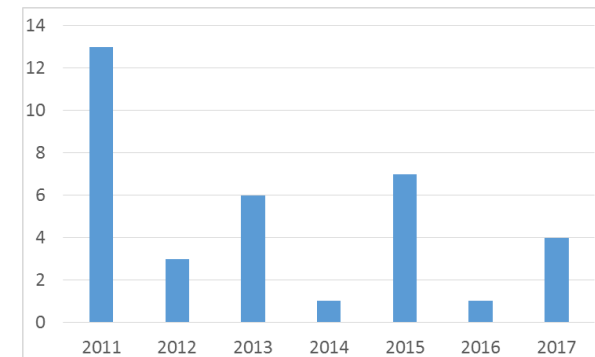
Подключение к сети по годам



Начало строительства по годам



Окончательный останов по годам



Энергия и ресурсы

- «В мировом масштабе выживет та страна, которая в точности будет знать свои ресурсы, сумеет направить на их использование народные духовные силы» - В.И.Вернадский



Место энергетики в мировом хозяйстве



«Энергетика... это не отрасль экономики, а система трансформации всех потенциальных ресурсов в совокупный капитал социума» В.В.Бушуев

Энергетика

- силовая часть системы управления механизмом получения и распределения природных благ

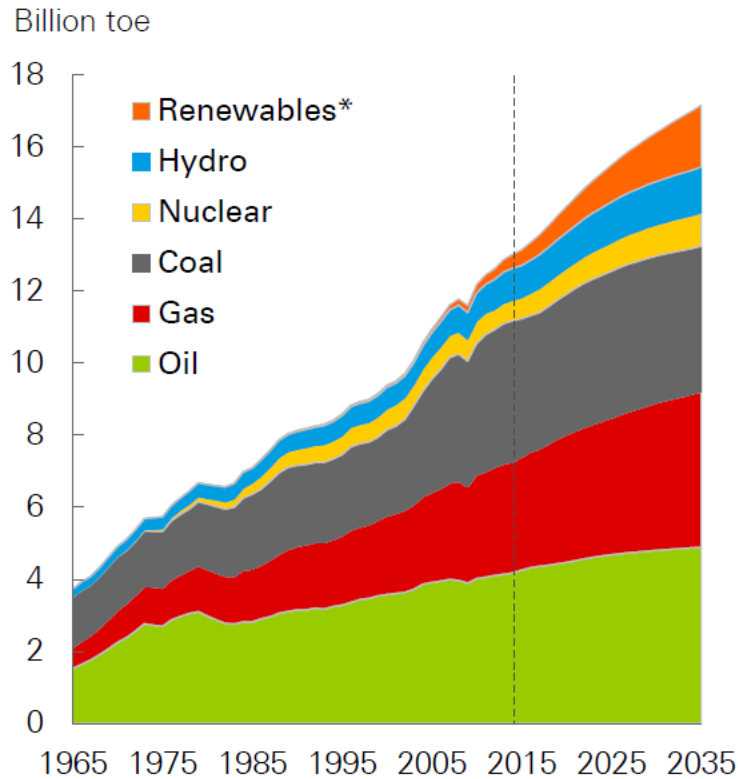
Особенности использования потенциалов ЯЭ

- Возможности использования потенциальных возможности ЯЭ в плане решения проблем устойчивого развития и решения проблем энергетической безопасности в значительной степени зависят от успехов и неудач других энерготехнологий.
- От этого зависят возможные масштабы использования ЯЭ и темпы ее развития. Специалисты из области ЯЭ в рамках своих традиционных компетенций не могут воздействовать на это только на уровне технических мер и решений.
- В ядерной отрасли должны появиться соответствующие компетенции, необходимые для позиционирования потенциальных возможностей этой технологии в общественном сознании, экономических и правовых пространствах на соответствующих уровнях.
- Ядерные технологии в большей степени приносят с собой новые возможности в плане организации хозяйственной деятельности, чем просто расширение энергетической базы.

Различные проекции понимания двухкомпонентности инновационной системы ЯЭ

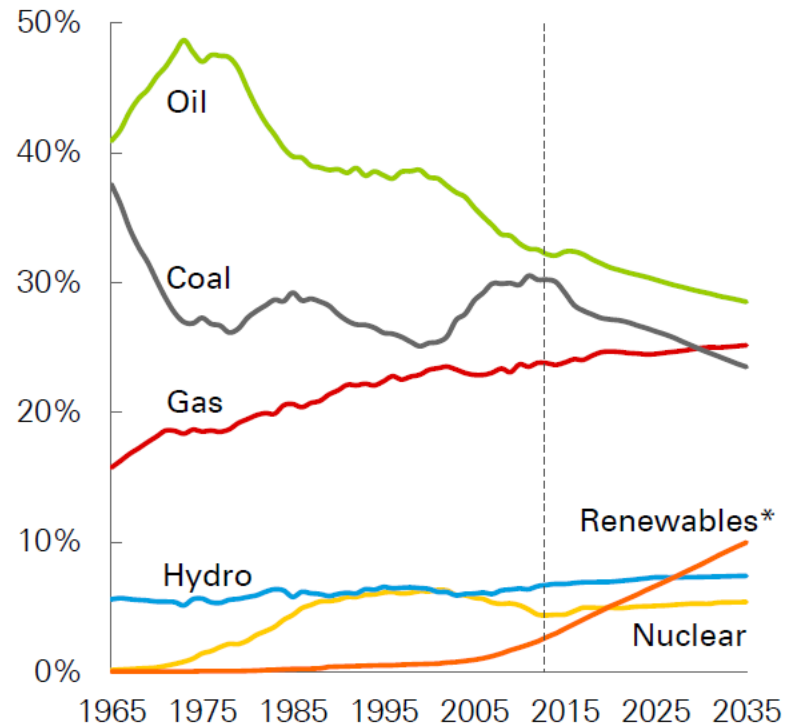
- Реакторы на тепловых и быстрых нейтронах
- ИНПРО и Gen IV
- ЯТЦ, как системообразующий фактор, и ЯЭУ
- Источники нейтронов (уран²³⁵, плутоний и уран 233 на складе, ТИН, ускорительные системы)
- Деление тяжелых и синтез легких ядер
- Материальная инфраструктура ИЯЭС и ее идеальный образ и интеллектуальное наполнение и сопровождение на основе различных типов моделей (*сценарное моделирование для детализации постановки задачи и принятия решений, проектные, эксплуатационные, анализ последствий реализации принятых решений*)

Primary energy consumption by fuel



*Renewables includes wind, solar, geothermal, biomass, and biofuels

Shares of primary energy



Влияние характеристик БР на масштабы развития двухкомпонентной ЯЭ

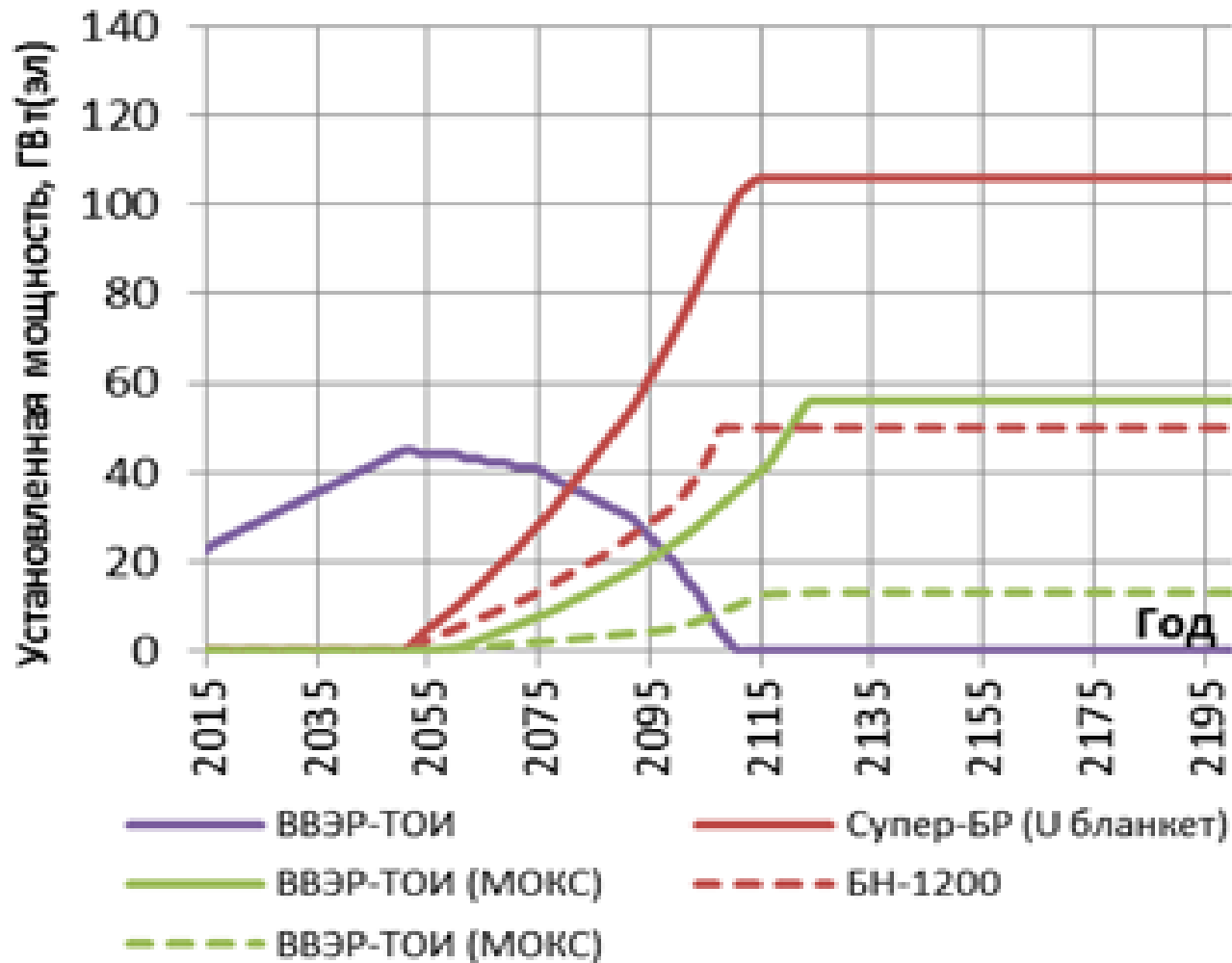


Схема перехода от конкуренции энерготехнологий к их взаимосогласованному сосуществованию

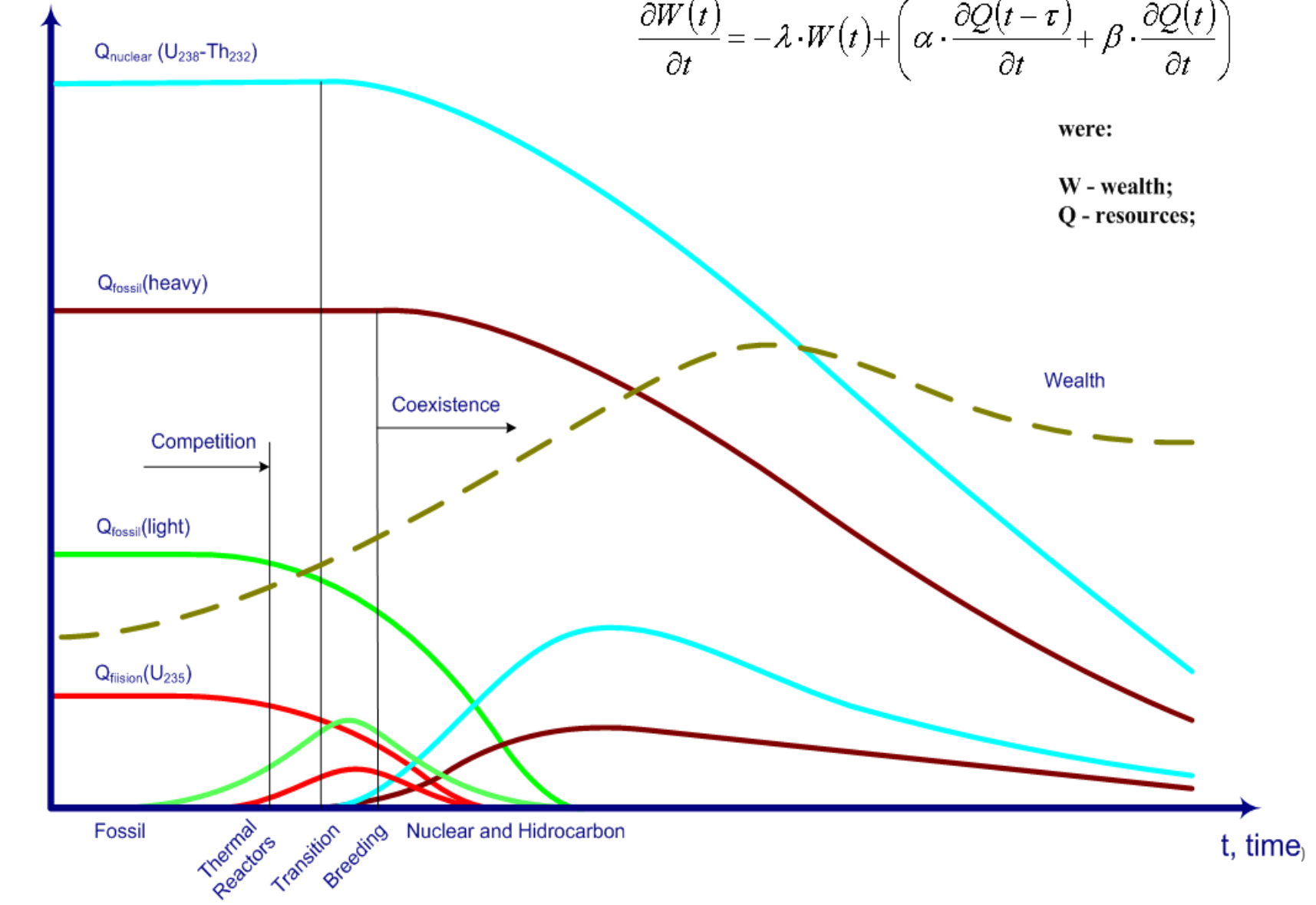
Resources,
Rate of consumption

$$\frac{\partial W(t)}{\partial t} = -\lambda \cdot W(t) + \left(\alpha \cdot \frac{\partial Q(t-\tau)}{\partial t} + \beta \cdot \frac{\partial Q(t)}{\partial t} \right)$$

were:

W - wealth;

Q - resources;



Потенциальные возможности решения проблем ЯЭ

	ТР	БР	ЖСР	ТР+Б Р	ТР+БР+Ж СР
Различные сферы использования (регионы, технологии)	+	-	-	+	+
Эффективность использования ресурса (урана ²³⁵ , урана ²³⁸ , тория)	-	+/-	+	+/-	+
Утилизация минорных актинидов (Pa, Np, Am, Cm,...)	-	-	+	-	+
Утилизация плутония и минорных актинидов на завершающей стадии развития системы ЯЭ	-	-	+	-	+

Проблемы ЯЭ

- Масштабы и темпы развития ЯЭ будут определять набор и уровень тех проблем, которые должна решить ЯЭ для выполнения своей миссии.
- И спектр решений, которые сейчас предлагаются, простирается от заведомо достаточных при низком уровне востребованности ЯЭ, до тех уровней, для которых в области ЯЭ пока решений нет в рамках того, что уже присутствует не только на столах конструкторов и проектантов, но и даже в их головах.
- Поскольку мы находимся в области принципиальной неопределенности масштабов и темпов, нам необходимо на уровне прогнозов выявить те проблемы, которые предстоит решать в различных ситуациях и оценить те ресурсы, которые необходимы для их решения или принятия решений в те времена, когда необходимая ясность с будущими масштабами и темпами наступит.
- Отдельно встает проблема подготовки ресурсов к предполагаемому времени принятия решений. Среди ресурсных проблем наиболее важной, помимо доступных источников нейтронов в виде урана 235, плутония, урана 233, является подготовка соответствующих специалистов, обладающих необходимым набором теорий для адекватной оценки ситуации с учетом прошлого опыта и имеющихся ресурсов и трендов развития различных технологий, которые уже или только будут связаны с судьбой ЯЭ.

Некоторые парадоксы

- Решение проблемы устойчивого развития выводит рассмотрение перспектив развития ЯЭ на уровень выявления и анализа парадоксов, как в силу нашей «теоретической» неготовности в рамках привычной логики увидеть и анализировать сложившуюся реальность с учетом появления ядерных технологий, так и наличия своего рода образовательного парадокса, поскольку вместо научения процессу мышления специалистов, как способу получения директивы для действий с учетом долговременных последствий в соответствующих новых условиях, процесс обучения построен по принципу внедрения в головы будущих компетентных специалистов старых знаний (а других и быть не может) для решения будущих проблем.

Системный парадокс

- ЯЭ необходимо рассматривать в качестве системы в понятиях целостности, структуры, связи, элемента, отношения подсистем между собой и с вмещающими системами, что требует рассмотрения взаимозависимости системы и внешней среды, иерархичности, множественности описания каждой системы (в силу принципиальной сложности каждой системы её адекватное познание требует построения множества различных моделей, каждая из которых описывает лишь определённый аспект).
- Возникший парадокс иерархичности системного рассмотрения состоит в том, что решение задачи описания любой системы ЯЭ возможно лишь при условии решения задачи описания данной системы как элемента более широкой энергетической и хозяйственной систем, а решение последней задачи возможно лишь при условии решения задачи описания ЯЭ как системы. Выход из этого парадокса состоит в использовании метода последовательных приближений, позволяющего путём оперирования неполными и заведомо ограниченными представлениями о системе ЯЭ постепенно добиваться более адекватного знания об исследуемой системе. Этот парадокс разрешим через создание механизма стратегического сопровождения процесса развития ЯЭ.
- При отсутствии стратегии развития ЯЭ вследствие неопределенности масштабов и темпов развития, ЯЭ должна развиваться как система, все её наполнение необходимо соотносить с методологией развития ЯЭ как системы (ИНПРО), учитывая по возможности имеющийся базис, историю, ресурсы, цели.

Некоторые аспекты видения ЯЭ в свете грядущей (ядерной?) экономики:

- В стоимость исчерпаемого ресурса (урана 235) необходимо включать затраты на разработку компенсирующего ресурса;
- Конкуренция сильно упрощает проблему, основная трудность связана с гармонизацией всевозможных технологий во времени и в соответствующих структурах;
- Необходимо учитывать естественное падение эффективности органических энерготехнологий как за счет перехода ко все менее качественным и более труднодоступным ресурсам, так и за счет необходимости компенсировать экологические последствия;
- Необходимость разработки и учета новых ограничений, требований, запретов и табу
- Появление новых ценностей или смещение акцентов с материальных ценностей (что неизбежно) к духовным;
- А.Смит – 200 лет срок допустимого эгоизма; Д.М.Кейнс – 100 лет допустимого сумасшествия, когда подлость приносит прибыль, а благородство нет: общество эгоистов себя не воспроизводит на сколько-нибудь значимом временном интервале;
- Если ЯЭ основана на нейтронной физике, то в экономике ЯЭ должна появиться цена нейтрона и, соответственно, цена источников нейтронов.
- Эпоха ограниченных ресурсов это эпоха конфликтов, уран 235, в качестве энергоресурса, не решает проблемы ограниченности ресурсов, его необходимо рассматривать как источник нейтронов, и система ЯЭ должна обладать способностью его воспроизводить в форме плутония или /и урана 233.

Приоритет выигрышей в ближней перспективе

В области использования ядерных технологий жизненный цикл функционирования объектов, технологий таков, что необходимо оценивать как выигрыши, так и риски на весьма длительных временных интервалах, заметно превышающих времена ответственного принятия решений.

На основе имеющихся моделей и баз данных, которые позволяют оценивать как выгоды, так и риски сейчас принимаются решения, которые в принципиально большей степени ориентированы на возможные выигрыши.

Этот приоритет обусловлен и тем, что:

- выигрыши приносят пользу в первую очередь тем, кто принимает решения (пусть в дальнейшем и оказавшимся ошибочными), а последствия пренебрежения рисками ложатся на плечи принципиально большего круга лиц, государства, общества в целом или всего человечества;
- риски более отдалены во времени по сравнению с временами ожидаемых выигрышей, а это ведет к большей неопределенности как в моделях, так и в переменных, которые используются для оценки рисков, по сравнению моделями и переменными для оценки выгод;
- специалисты обладают своеобразным ясным видением того, в чем они специалисты, но они не обладают достаточной полнотой знаний в области всевозможных рисков, поскольку оценки рисков требуют более широкого набора теорий, гипотез, принципов, баз данных, чем это доступно отдельному специалисту или даже фирме и корпорации.

Приоритет рисков в отдаленной перспективе

- Но, если нам сейчас необходимо принять решения о том отдаленном будущем, в котором наших реальных интересов в плане получения материальных ценностей в силу очевидных причин быть не может, то ситуация и акценты могут серьезно поменяться, поскольку последствия принимаемых решений могут быть катастрофическими, а выигрыши не значительными и обобщественными, и предпочтения по всей видимости сместятся с выгод на риски.

Приоритет рисков в отдаленной перспективе

- Сейчас это общественное явление присутствует в виде довольно неопределенных требований устойчивого развития, соображений и мнений по безопасности и экологической приемлемости, нераспространению ядерных материалов и специальных чувствительных знаний и технологий, которые в области ЯЭ принципиально сдерживают ее развитие, поскольку они буквально воспринимаются как божественные заповеди, записанные на скрижалях, а не как неудачный опыт устаревших и давно уже на самом деле неэффективных технологий.
- В силу эффективности ядерных технологий это пока допустимо, но при этом эффективность ядерных технологий индексируется, оценивается и понимается в рамках моделей, понятий, индикаторов, разработанных без всякого учета тех принципиально новых возможностей, что приносят с собой ядерные технологии.

Приоритет рисков в отдаленной перспективе

- Необходимо разрабатывать модели оценки выигрышей и рисков для подготовки обоснованных решений в будущем, поскольку без них не появляется научного видения будущего, необходимого для подготовки принятия решений по отложенным на будущее проблемам как касательно ресурсной обеспеченности ЯЭ, так и по обращению с ОЯТ и РАО.
- Эти модели должны выдавать информацию, доступную для понимания и обсуждения широкими кругами специалистов и общественности для своего рода взвешивания выгод и рисков как бы демократическим путем (отстраненно, в силу того, что ни выгоды ни риски самих «экспертов» или «выборщиков» лично в материальном плане не коснутся).
- Что предлагается сейчас специалистами, ориентированными на получение эффективных решений в области их профессионального видения и понимая, в плане стратегии развития ЯЭ, весьма опасно даже в случае если они искренне верят в эффективность и приемлемость того, что они сейчас предлагают внедрять для решения будущих проблем.

Проблемы безопасности в грядущей ядерной экономике

- Понижение единичной мощности (в 10 раз меньшая единичная мощность в сто раз меньшая опасность, расширение рынков использования и конкурентоспособности)
- Увеличение запасов (Удаление) условий эксплуатации от эксплуатационных пределов
- Снижение глубины выгорания топлива (для улучшения нейтронного баланса, рецикла конструкционных материалов)

Этические аспекты развития ЯЭ

- «Кто двигается вперед в знании, но отстает в нравственности, тот более идет назад, чем вперед»
Аристотель
- Этика – философское учение, призванное **помочь стать человеку настолько моральным, чтобы человек становился ответственным и сам находил правильные решения с учетом своих долговременных целей.**
- «Важно понять, что природа энергии современной физике неизвестна» Р.Фейнман, 1964 г.
- Императив ответственности гласит: **поступай так, чтобы обеспечить благоприятное будущее тому интегральному целому, к которому ты принадлежишь**

Особенности переходного периода развития ЯЭ:

Эволюция АЭС от конкуренции и выживания отдельных установок к системе ЯЭ, отвечающей требованиям устойчивого развития

До тех пор пока система АЭ не появилась и не накоплен опыт ее эксплуатации, не стоит ожидать появления устойчивых требований или регламентов, и приходится **при принятии решений опираться на анализ, основанный на исследовании возможных сценариев развития как системы АЭ, так и изменения условий и целей ее развития, помогающий выработать рекомендации в плане:**

- Прогнозирования целей и задач на разные отрезки времени и разные возможные условия;
- Прогнозирования изменений условий, возникновения опасностей и угроз;
- Поиска путей решения выявленных и прогнозируемых проблем и использования для этого различных возможностей и ресурсов;

при этом имея в виду, что **опасности и угрозы реализуются сами, а над возможностями необходимо работать заблаговременно.**

Перспективы технического, экономического и социального развития ядерной энергетики и АС

- *«В этом мире существует лишь две трагедии: первая – когда не добиваешься того, чего хочешь, вторая – когда добиваешься»*
Оскар Уайльд
- Для общества, вставшего на путь экономического развития, преследующего и исповедующего экономические цели и интересы важно осознать, что то богатство и возможности, которые мы получили благодаря использованию исчерпаемых дешевых и качественных органических ресурсов мы сможем сохранить только при масштабном использовании АЭ – единственно доступного нам дешевого и практически не исчерпаемого источника энергии, использование которого возможно без масштабного вторжения в природные процессы, понимание которых к нам придет значительно позже того времени, которое предоставлено нам на принятие решений и реализацию мер уже сейчас.
- АЭ это единственная технология, которая может помочь расплатиться нам за кредиты в виде качественных и дешевых исчерпаемых ресурсов, которые мы буквально за столетие сожгли имея возможность не спрашивать разрешения на это у будущих поколений, которые на них имеют не меньшие права, чем мы, ныне живущие.

Некоторые граничные условия постановки задачи

- ядерная энергетика единственный существующий масштабный энергетический резерв
- репродуцирование современной структуры АЭ не решает энергетических проблем. Необходимо организовать полномасштабный топливный цикл, чтобы задействовать энергетический ресурс урана -238
- нельзя выделить какое-либо одно из направлений развития ядерных технологий, которое решило бы все задачи, стоящие перед ЯЭ.
- мы не знаем совокупности всех условий и требований, которые возникнут в будущем и будут определять выбор структуры ЯЭ и отбор ЯЭУ, и выбор этот предстоит делать не нам.
- существующие, разрабатываемые и предлагаемые реакторные направления не обладают ни в отдельности, ни в их совокупности необходимым и достаточным для осуществления убедительного выбора набором характеристик, физических и математических моделей, экспериментальной и технологической базами. .

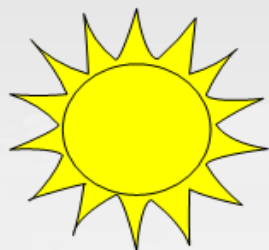
Механизм развития ИЯЭС

- При постановке задачи следует исходить из базового экономического принципа устойчивого развития ИЯЭС (ИНПРО): Энергия и связанные с ней изделия и услуги от инновационных систем ядерной энергии должны быть доступны в плане наличия и приемлемы по цене, или другими словами **ИЯЭС должна быть технически реализуема с помощью экономических методов**, поскольку других способов ее масштабной реализации сейчас нет.
- При этом исходя из того, что фундаментальной предпосылкой классической экономики является то, что богатство и уровень жизни растут в результате преследования участниками рынка долговременной личной выгоды (А.Гринспен), **необходимо так рационально поставить задачу развития ИЯЭС как системы, чтобы ее структура, масштабы и цели могли стать интересны практически всем** тем заинтересованным производителям и потребителям услуг ЯЭ, которые сейчас видят друг в друге конкурентов или противников.

Базовые физические принципы устойчивого развития ЯЭ, удовлетворение которым требует замыкания ЯТЦ

- Риск пропорционален мощности ЯЭ, а не интегральной энерговыработке (замыкание ЯТЦ по всем опасным радионуклидам);
- **Нейтронная эффективность ЯЭ должна возрастать (бридинг и внешние источники нейтронов);**
- Минимизация времени жизни (количества) опасных радионуклидов в системе (разные типы реакторов в системе ЯЭ);
- Эффективное использование радионуклидов, включая использование всего добываемого топлива (замыкание ЯТЦ по актинидам);

Потенциальные возможности ЯЭ, как основы устойчивого развития



10^5 млрд т.н.э./год

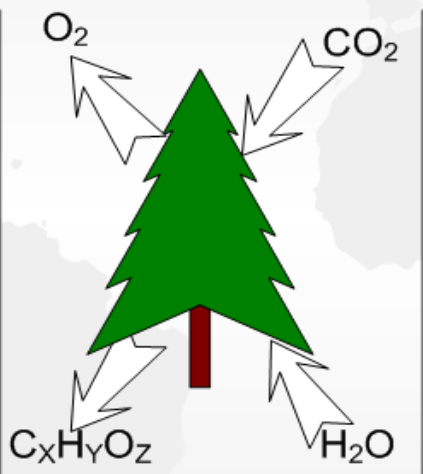
Возобновляемые

2 млрд т.н.э./год



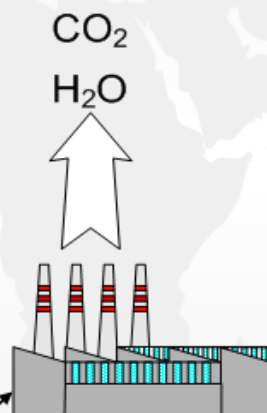
Фотосинтез

100 млрд т.н.э./год



Органическая энергетика

10 млрд т.н.э./год



Ядерная энергетика

10 млрд т.н.э./год

10 млрд т.н.э./год
Эл. энергия



0.01%

Легкие углеводороды: 500 млрд т.н.э.

Тяжелые углеводороды > 5000 млрд т.н.э.

U_{235} – 60 млрд т.н.э.
 $U_{238} + Th_{232} > 20000$ млрд т.н.э.

Извлекаем: > 10 – 14 распадов на атом
Захороняем: < 0.2 распада на извлеченный атом

Некоторые выводы

- Энергетика – силовая часть системы управления природными процессами. Устойчивое развитие это не столько усиление средств управления, сколько более глубокое понимание того, чем и с какими целями управляем.
- ЯЭ – это новые качества, которые мы еще должны осознать и выработать соответствующие новые понятия и новые образы, доступные не только для осмысления специалистами по ЯЭ, но и теми, кто может содействовать ее «вживлению» в устойчивый хозяйственный процесс с учетом экологических ограничений.
- В принципе, ЯЭ и ядерные технологии при соответствующей организации их использования могут позволить нам не только повышать эффективность «фотосинтеза», но и более адекватно на уровне новых теорий принимать своевременные решения.

**Благодарю Вас
за внимание!**