



АНАЛИЗ КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТИ ПРОЕКТА ЭНЕРГОБЛОКА БН НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ С УЧЁТОМ СИСТЕМНЫХ ТРЕБОВАНИЙ

П.Н. Алексеев, А.А. Андрианов, М.В. Баканов, А.Л. Баланин,
А.В. Гулевич, В.М. Декусар, А.Ф. Егоров, В.В. Коробейников,
Е.В. Марова, А.М. Маслов, А.Л. Мосеев, В.А. Невиница,
П.С. Теплов, М.Р. Фаракшин, П.А. Фомиченко, С.Ф. Шепелев

Нейтроника-2019
27-29.11.2019

Введение

- ❑ Решением президиума НТС Госкорпорации «Росатом» 26 декабря 2018 года одобрена «Стратегия развития ядерной энергетики России до 2050 года и перспективы на период до 2100 года» (далее Стратегия)
- ⇒ повышение экономического результата Госкорпорации в России и на глобальном рынке через создание конкурентоспособного продукта для включения в создаваемую двухкомпонентную систему ядерной энергетики страны и для поставок за рубеж
- ⇒ ближнесрочная перспектива: снижение удельной приведенной стоимости электроэнергии (LCOE), повышение референций по современным технологиям реакторных систем и компонентов ядерного топливного цикла (ЯТЦ)
- ⇒ среднесрочная перспектива: снижение потребления природных ресурсов и обращения с отработавшим ядерным топливом (ОЯТ) и радиоактивными отходами (РАО) в составе двухкомпонентной ЯЭС
- ⇒ долгосрочная перспектива: полное замыкание ЯТЦ и выход ЯЭС в режим самообеспечения топливом



Развитие технологии реакторов на быстрых нейтронах с оптимальными топливными характеристиками

О конкурентоспособности

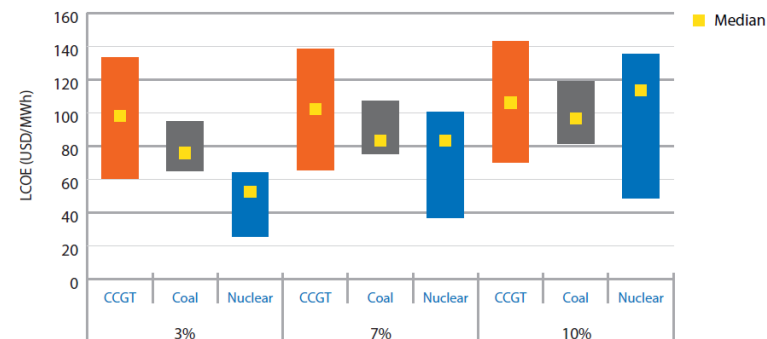
- ❑ Конкурентоспособность продукта - понятие комплексное, включающее формирование предложения на всем жизненном цикле АЭС, эффективные операционные издержки на всех этапах цепочки создания стоимости и, как следствие, низкую LCOE, при обеспечении требуемой безопасности эксплуатируемых и сооружаемых объектов
- ❑ Позиция разработчиков проекта БН
 - ⇒ в обоснование решений должен быть применён подход к оценке, при котором рассматривается комплексное взаимное влияние показателей, характеризующих системную роль энерготехнологий, таких как экономические показатели, безопасность, экологическое воздействие, уровни готовности технологий и производства, риски реализации, перспективы развития, включая оценку доступности и эффективности использования ресурсов, состояние инфраструктуры



**Развитие методик расчетно-аналитического обоснования
технических и управленческих решений в обеспечение развития
ЯЭС, включающих расчетные средства на базе технико-
экономических моделей, сценарно-динамического анализа,
анализа технологий с использованием матрицы
конкурентных преимуществ**

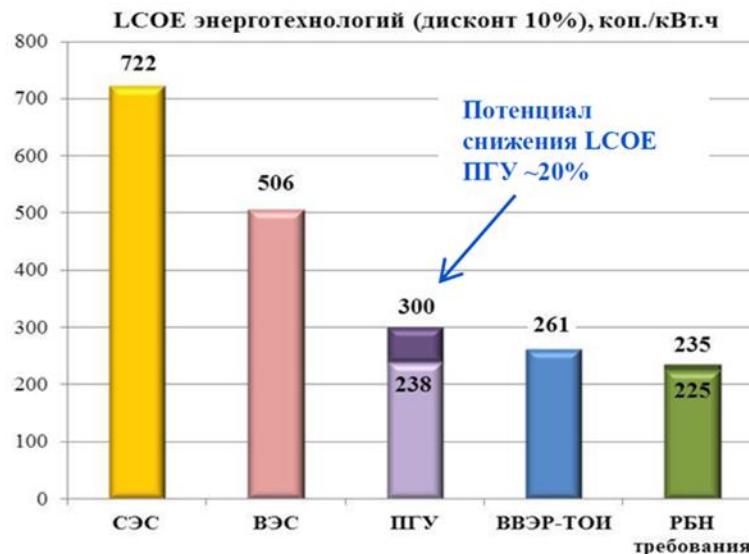
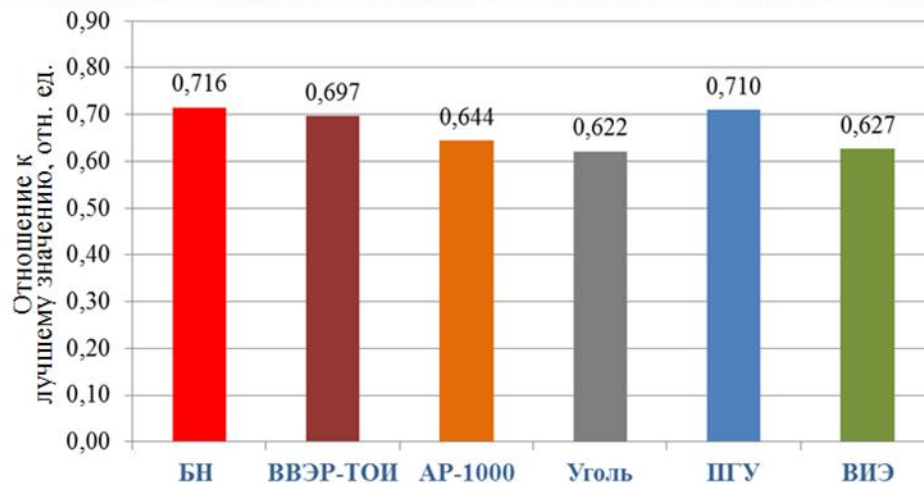
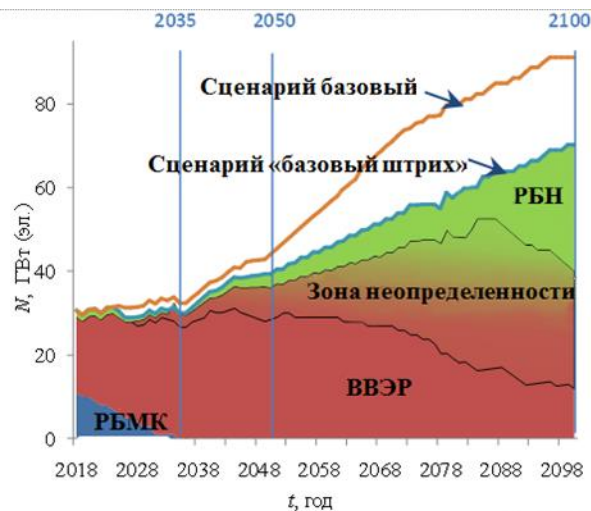
Эволюция подходов при анализе конкурентоспособности

- ❑ LCOE - результат эволюции от соотношения полезного эффекта и затрат на его получение до показателя экономической эффективности электрогенерирующих технологий на основании их технико-экономических характеристик
- ❑ Два типа исследований с использованием сценарно-динамических моделей и моделей энергетического планирования:
 - ⇒ тип 1 - оценка конкурентоспособности ядерных энерготехнологий с привязкой к конкретной точке размещения и учетом специфики энергетического и экономического окружения;
 - ⇒ тип 2 - оценка роли и места конкретной технологии в структуре ядерной энергетики и ее топливного цикла
- ❑ Анализ конкурентоспособности энерготехнологий и технологий ядерного топливного цикла на использовании формализованных методов дискретного анализа решений (MAVT, AHP, TOPSIS и др.)



Синтез подходов для комплексного технико-экономического обоснования эффективности и конкурентоспособности энерготехнологий и технологий топливного цикла на сценарном и технологическом уровнях

Различные подходы для анализа конкурентоспособности



Уровень неопределенности значений ключевых показателей в зависимости от стадии разработки оцениваемой системы

ESTIMATE CLASS	Primary Characteristic	Secondary Characteristic			
	LEVEL OF PROJECT DEFINITION Expressed as % of complete definition	END USAGE Typical purpose of estimate	METHODOLOGY Typical estimating method	EXPECTED ACCURACY RANGE Typical variation in low and high ranges [a]	PREPARATION EFFORT Typical degree of effort relative to least cost index of 1 [b]
Class 5	0% to 2%	Concept Screening	Capacity Factored, Parametric Models, Judgment, or Analogy	L: -20% to -50% H: +30% to +100%	1
Class 4	1% to 15%	Study or Feasibility	Equipment Factored or Parametric Models	L: -15% to -30% H: +20% to +50%	2 to 4
Class 3	10% to 40%	Budget, Authorization, or Control	Semi-Detailed Unit Costs with Assembly Level Line Items	L: -10% to -20% H: +10% to +30%	3 to 10
Class 2	30% to 70%	Control or Bid/Tender	Detailed Unit Cost with Forced Detailed Take-Off	L: -5% to -15% H: +5% to +20%	4 to 20
Class 1	50% to 100%	Check Estimate or Bid/Tender	Detailed Unit Cost with Detailed Take-Off	L: -3% to -10% H: +3% to +15%	5 to 100

Notes: [a] The state of process technology and availability of applicable reference cost data affect the range markedly. The +/- value represents typical percentage variation of actual costs from the cost estimate after application of contingency (typically at a 50% level of confidence) for given scope.

[b] If the range index value of "1" represents 0.005% of project costs, then an index value of 100 represents 0.5%. Estimate preparation effort is highly dependent upon the size of the project and the quality of estimating data and tools.

Логика и структура предлагаемого подхода к МКА систем и объектов двухкомпонентной ЯЭС

- ❑ Основное положение предлагаемого подхода - отказ от прямого противопоставления ядерных энерготехнологий между собой
- ❑ Применимость методов многокритериальной оптимизации для предварительного отсева неэффективных вариантов и сокращения опций при последующем анализе
- ❑ Решаемые задачи:
 - ⇒ определение структуры ЯЭС с учетом системных требований и на всем жизненном цикле её объектов, в различных приближениях – в автономном рассмотрении и с учетом развития энергосистемы России в целом
 - ⇒ выявление перспектив рынка энерготехнологий в ЯЭС
 - ⇒ определение целевых требований к энерготехнологиям, включая технико-экономические показатели
 - ⇒ оценка актуальных показателей конкурентоспособности энерготехнологий с учетом диапазона их неопределенности
 - ⇒ разработка рекомендаций по улучшению показателей энерготехнологий

Анализ международного опыта по МКА энерготехнологий

Окружающая среда/природопользование (69)

Технико-экономические показатели (131)

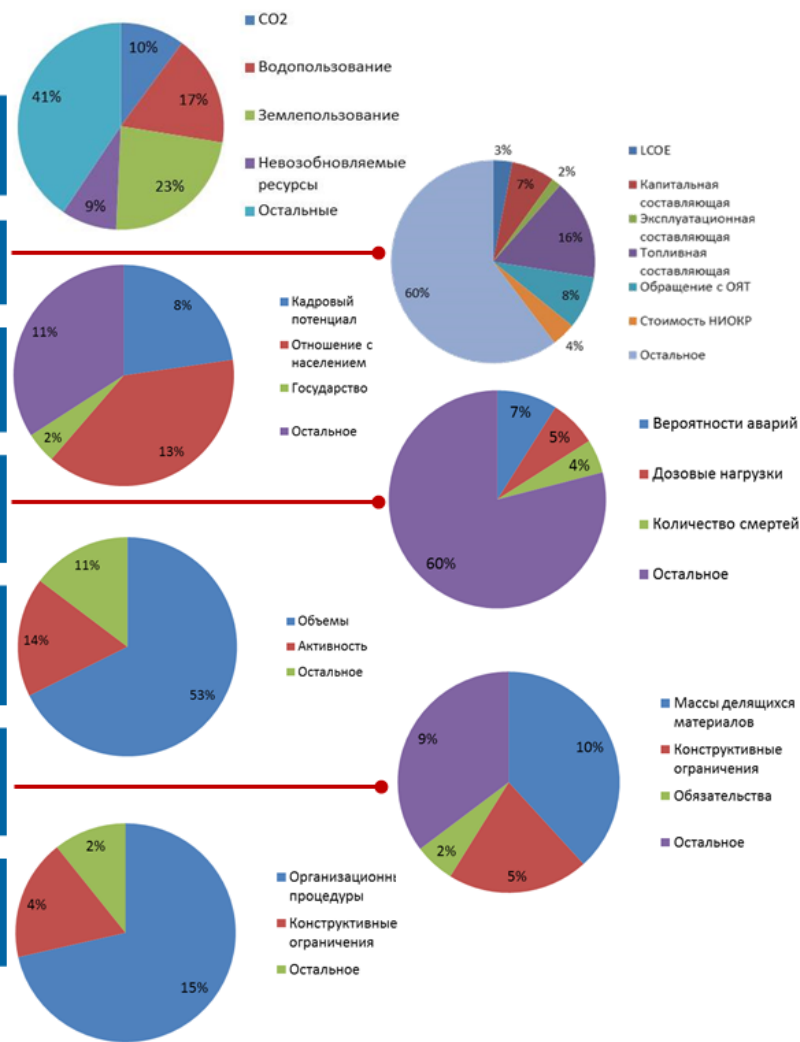
Социальные показатели (44)

Безопасность (100)

Отходы (102)

Устойчивость к распространению (34)

Физическая защита (28)



В скобках представлено общее количество критериев по выделенным группам

Верхние уровни дерева целей и области оценки энерготехнологий

Области оценки в международных проектах

1. Окружающая среда/природопользование
2. Техничко-экономические показатели
3. Социальные показатели
4. Безопасность
5. Отходы
6. Устойчивость к распространению
7. Физическая защита

Экономическая эффективность	Группа 1. Экономические и финансовые показатели
Технологическая эффективность	Группа 2. Безопасность Группа 3. Зрелость технологии и риски Группа 4. Воздействие на окружающую среду
Доступность	Группа 5. Перспективы использования энерготехнологий, включая экспортный потенциал Группа 6. Устойчивость к распространению

- ⇒ Ориентация на трехуровневое дерево целей при проведении многокритериального анализа энерготехнологий для структурирования матрицы критериев
- ⇒ Многоэтапная процедура сравнения, при необходимости, через использование «первичных» и «вторичных» индикаторов
- ⇒ Применение на первом этапе различных методов агрегации, оценки весов, программных средств
- ⇒ Ориентация на проведение расширенного анализа чувствительности и неопределённости результатов по отношению к весам, значениям критериев и прочим параметрам
- ⇒ Представление результатов ранжирования с разбиением итоговых баллов в соответствие с областями оценки и целями высокого уровня

Принципы отбора критериев конкурентных преимуществ, или что стоит за значениями критериев

- ❑ Начальное условие - уровень готовности новых перспективных технологий, которые собираются внедрять
- ❑ Граничные условия : располагаемое количество природного урана и плутония, который уже наработан и ещё должен быть наработан для обеспечения планируемого в вариантах стратегии развития ЯЭ роста мощностей
- ❑ Дополнительные условия:
 - ⇒ потребительская привлекательность: гарантированная безопасность, экономическая эффективность
 - ⇒ структура энергопроизводства: обеспечение многоцелевого использования по областям применения, то есть расширение рынков сбыта и многокомпонентность как фактор гибкости и устойчивости к возможным рискам
 - ⇒ сырьевая база на российской территории: отсутствие ограничений на исторически значимый период времени (сотни лет)
 - ⇒ обращение с отходами: обеспечение безопасной окончательной изоляции РАО
 - ⇒ эффективное выполнение экспортных обязательств по строительству энергоблоков и обращению с ОЯТ, полученном на этих блоках

Первичные критерии конкурентных преимуществ

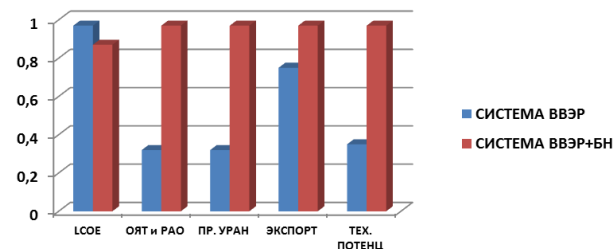
- Ограниченный набор ключевых индикаторов, основная часть которых позволяет провести однозначную оценку и имеет невысокий уровень неопределённости

Высокоуровневые цели	Области оценки	Ключевые показатели
Экономическая эффективность	Экономические и финансовые показатели	LCOE, руб/кВт·ч
		ССДП (NPV), трлн. руб
Техническая эффективность	Безопасность	Вероятность тяжелого повреждения ключевого элемента системы, 1/год
		Вероятность аварии с отселением населения, 1/реактор·год
		Наличие факторов потенциальной опасности за пределами защитного корпуса ЭУ
Доступность технологии	Зрелость технологии и риски	Уровень технологической готовности (TLR)
		Уровень производственной готовности (MLR)
		Стоимость НИОКР, отн. ед.
		Обеспеченность нормативной базой
	Воздействие на окружающую среду	Тепловое загрязнение, -
		Водопотребление, м ³ /кВт(э)·ч
		Использование невозобновляемых ископаемых ресурсов, т.у.т./кВт(э)·ч
	Перспективы использования, экспортный потенциал	Время реабилитации территории после вывода из эксплуатации, годы
		Образование РАО, м ³ /кВт(э)·ч
		Долгосрочная достаточность топливного ресурса, МВт/год
	Устойчивость к распространению	Объем внутреннего рынка, энергоблоков/10 лет
		Объем внешнего рынка, энергоблоков/10 лет
		Многоцелевое коммерческое использование
		Соответствие государственных обязательств, обязанностей и политики в отношении нераспространения и их выполнения международным стандартам нераспространения
		Привлекательность ядерного материала в ЯЭС для ядерной оружейной программы
		Обеспечение своевременного обнаружения переключения ядерного материала и несанкционированного использования ядерных установок
		Предусмотренные в проекте внутренние присущие свойства и внешние меры защищенности от распространения
		Оптимизированная комбинация внутренние присущих свойств и внешних мер, совместимых с другими проектными решениями

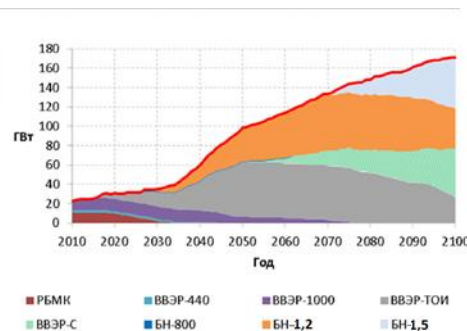
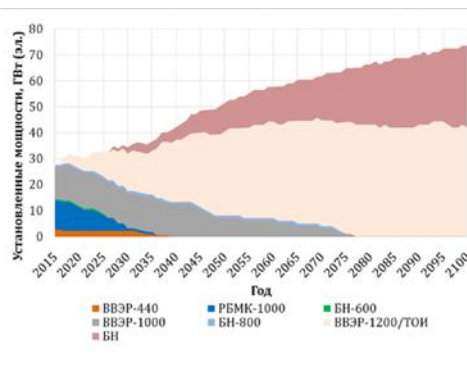
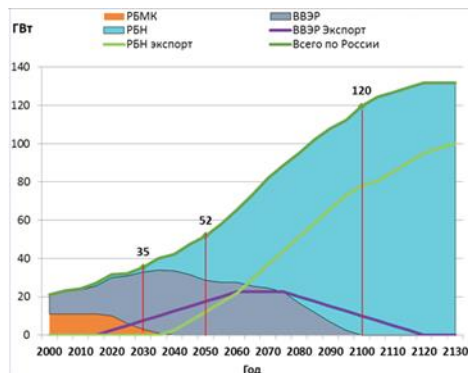
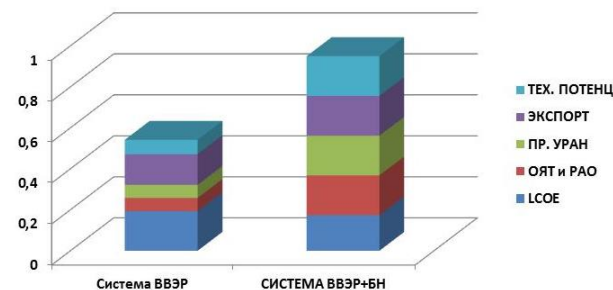
Сравнение однокомпонентной и двухкомпонентной систем энергетики по ключевым критериям и потенциалу в целом

- Многокритериальный сравнительный анализ сценариев развития однокомпонентной и двухкомпонентной систем показал, что с использованием набора ключевых критериев рейтинг двухкомпонентного сценария с замкнутым ЯТЦ существенно выше, чем однокомпонентного с открытым ЯТЦ
- Исследования чувствительности к неопределенности значений выбранных критериев и их весов показали, что значение рейтинга двухкомпонентной системы оказалось достаточно устойчивым к изменениям значений весов и критериев

Сравнение критериев

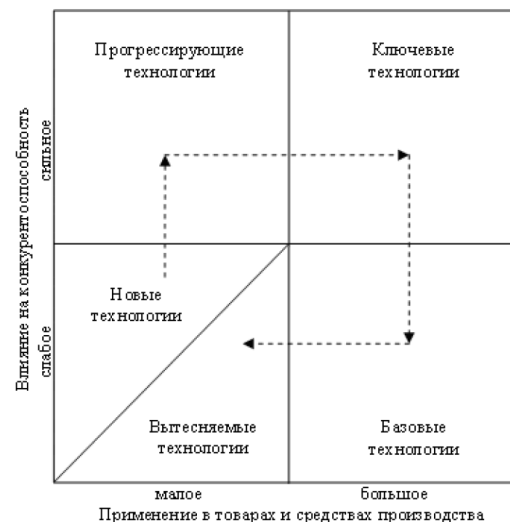
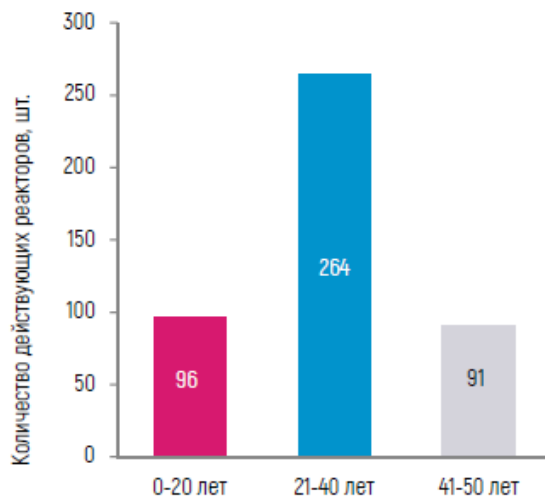


Сравнение систем ядерной энергетики



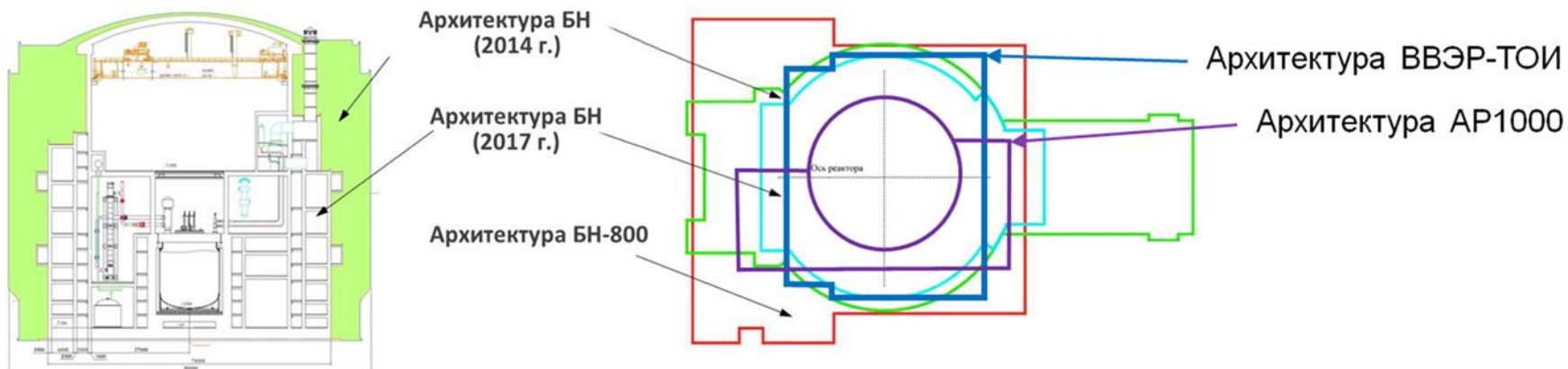
Проблема выбора

- ? Следует ли в основном ориентироваться на развитие базовой ядерной энерготехнологии настоящего времени (ВВЭР) и совершенствовать ее ядерный топливный цикл, ограничившись в части технологии быстрых реакторов исключительно действующими БН-600 и БН-800?
- ? Следует ли развивать технологию быстрых реакторов со свинцовым теплоносителем с постепенным вытеснением ВВЭР при отсутствии развития технологии БН?
- ? Можно ли реализовывать ядерную энергетическую систему с синергетическим развитием технологий ВВЭР и БН?



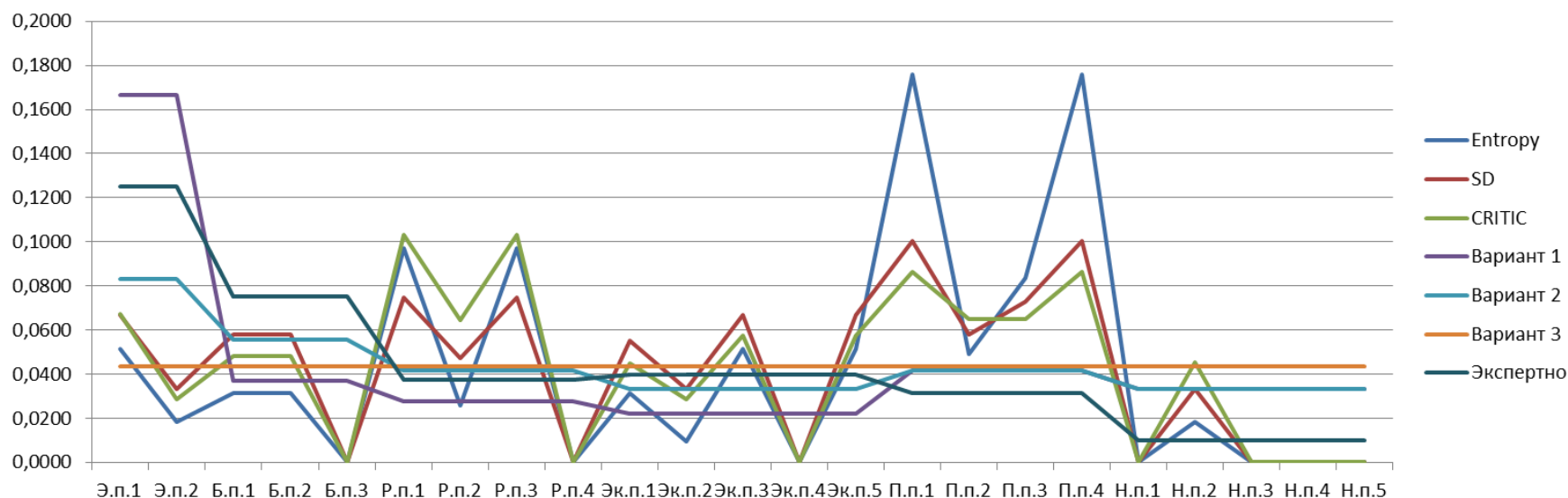
Возраст действующих в мире энергоблоков на июнь 2019 г. и диаграмма соотношения технологий

Статус технологий



Быстрые реакторы	лидерство	Наращивание темпа и формирование национального продукта, международное сотрудничество для определения рынков	ФЦП ЯЭНП, G4, ИНПРО
ЗЯТЦ и двухкомпонентность, в т.ч.:	лидерство (в целом)		
МОКС	отставание	Мероприятия по выводу завода на проектную мощность	ФЦП ЯЭНП
СНУП	лидерство	Завершение сооружения МФР	
РЕМИКС		Наращивание темпа	
Металл	отставание	Стадия, далекая от коммерциализации	
Пер-ка ОЯТ	Паритет/отставание	Формирование национального продукта	ФЦП ЯЭНП
Расплавы солей	паритет	Международное сотрудничество на стадии далекой от коммерциализации	G4 (меморандум)

Распределение весов критериев при различных подходах к их определению

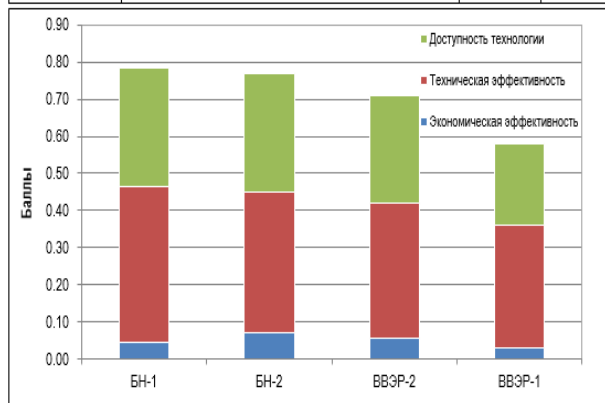


Рекомендован подход «экспертно-назначаемые» веса

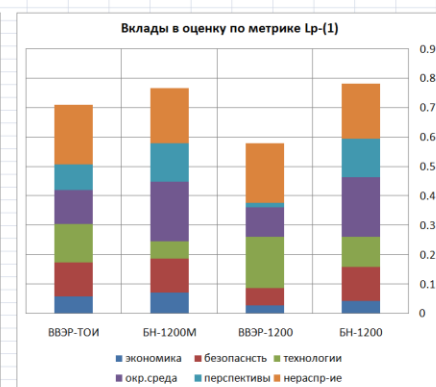
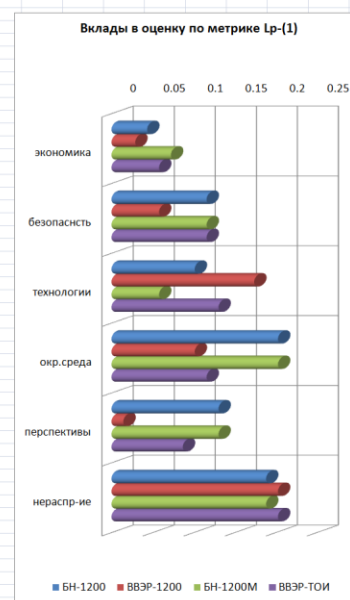
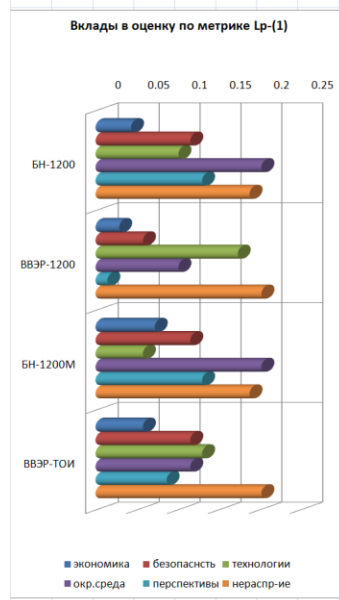
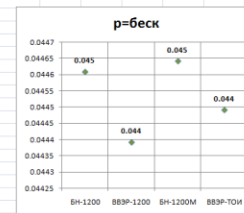
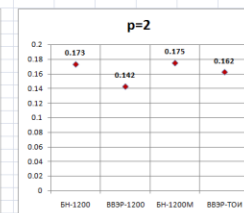
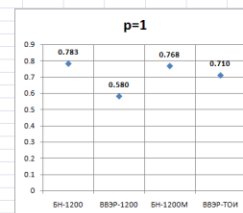
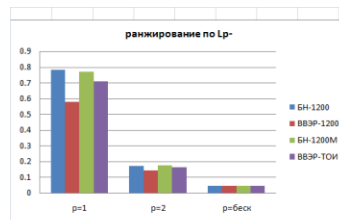
- ⇒ предполагает рассмотрение нескольких возможных вариантов весов, отражающих различное альтернативное видение перспектив и приоритетов развития
- ⇒ обеспечивает расстановку приоритетов в зависимости от цели исследований согласно запросу со стороны лиц, принимающих решение или Заказчика

Сравнение результатов ранжирования, полученных на основе метода MAVT с использованием различных инструментов

	Экономическая эффективность	Техническая эффективность	Доступность технологии	Баллы	Ранг
БН-1	0.043	0.420	0.319	0.783	1
БН-2	0.072	0.377	0.319	0.768	2
ВВЭР-2	0.058	0.362	0.290	0.710	3
ВВЭР-1	0.029	0.333	0.217	0.580	4



KIND-ET (ИНПРО/МАГАТЭ)



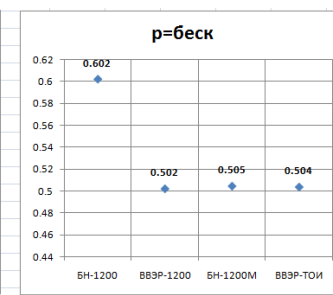
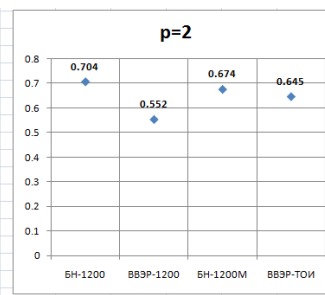
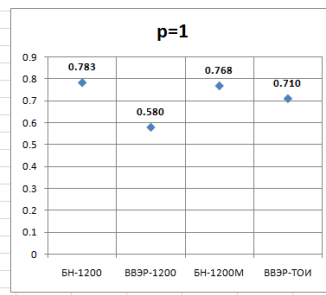
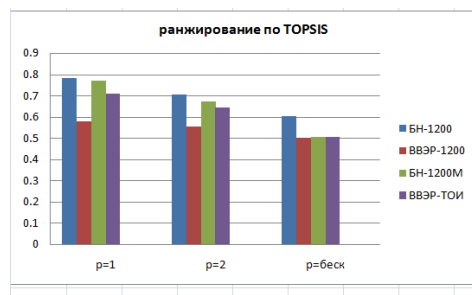
IDEAL (LP-1 метрика)

Сравнение результатов ранжирования, полученных на основе метода TOPSIS, с использованием различных инструментов

	до анти-идеальной	до идеальной	индекс схожести	ранг
БН-1	0.048	0.034	0.589	1
БН-2	0.049	0.042	0.538	2
ВВЭР-2	0.044	0.041	0.514	3
ВВЭР-1	0.037	0.054	0.411	4

Ранжирование с использованием «классического» варианта TOPSIS

			БН-1200	ВВЭР-1200	БН-1200М	ВВЭР-ТОИ	0	
метрика	TOPSIS	p=1	0.7826087	0.5797101	0.7681159	0.7101449	0	
		p=2	0.7044284	0.5524579	0.6737481	0.6445949	0	
		p=беск	0.602291	0.5024521	0.5048646	0.5040235	0	
ранжирование по TOPSIS								



IDEAL (вариант TOPSIS НИЦ КИ)

Заключение

- ❑ Результаты выполненного анализа с целью выбора наиболее приемлемых параметров агрегации экспертных оценок и тестирования проекта методики МКА на примере задачи по сравнению четырех ядерных энерготехнологий ВВЭР и БН демонстрируют крайне слабую чувствительность рангов альтернатив к варианту рассмотренных весовых факторов
- ❑ Поскольку репрезентативный анализ чувствительности и неопределенности результатов ранжирования по отношению к основным параметрам модели поддержки принятия решений не был проведен на данном этапе, то результаты носят предварительный иллюстративный характер
- ❑ Развитие работ в ближайший период времени:
 - ⇒ определение подходов при взвешивании критериев, исключение в итоговой методике приближения равнозначности критериев, в том числе и по группам, и по целям верхнего уровня
 - ⇒ корректировка перечня критериев, в первую очередь в группе «устойчивость к распространению»
 - ⇒ корректировка дерева целей
 - ⇒ формирование базы данных со значениями критериев, полученным не экспертным путем, а посредством проведения достоверных количественных оценок, в том числе, на основе проектной документации