

Государственная корпорация по атомной энергии «Росатом»  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РФ —  
ФИЗИКО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ  
имени А.И.ЛЕЙПУНСКОГО

**ФЭИ-3289**

А. В. Зродников, В. В. Коробейников, А. Л. Мосеев, А. Ф. Егоров,  
В. М. Декусар, О. С. Гурская

**ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ СЦЕНАРИЕВ РАЗВИТИЯ  
ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ РОССИИ  
В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ЗНАНИЙ О БУДУЩЕМ**

Обнинск – 2020

УДК 621.039

**Зродников А. В., Коробейников В. В., Мосеев А. Л., Егоров А. Ф.,  
Декусар В. М., Гурская О. С.**

Оценка эффективности сценариев развития ядерной энергетики России в условиях неопределенности знаний о будущем: Препринт ФЭИ-3289. — Обнинск, АО «ГНЦ РФ – ФЭИ», 2020. 45 с.

В работе предлагается подход к расчетному обоснованию поэтапного перевода атомной энергетики России в режим двухкомпонентной ЯЭС с централизованным замкнутым ЯТЦ, основанный на использовании методов многокритериального анализа. При этом рассматриваются варианты развития ядерной энергетики, учитывающие неопределенность будущего.

Для выбора наиболее предпочтительных путей технологического развития и оценки эффективности ЯЭС используется ограниченный набор системных критериев выбора и показателей эффективности, охватывающий экономику, экспортный потенциал, конкурентоспособность, эффективное обращение с ОЯТ и РАО, потребление природного урана, а также инновационный потенциал развития.

The paper proposes an approach to the calculation justification of the phased transferring of nuclear energy in Russia to the regime of a two-component nuclear energy system with a centralized closed nuclear fuel cycle, based on the use of multicriteria analysis methods. The above mentioned approach takes into account uncertainty of the future nuclear energy development.

To select the most preferred technological development scenarios and evaluate the effectiveness of nuclear energy systems, a limited kit of the system criteria and performance indicators are used, covering the economy, export potential, competitiveness, effective management of spent nuclear fuel and radioactive waste, natural uranium consumption rate, and innovative development potential.

ISBN 978-5-907108-19-6

©АО «ГНЦРФ-ФЭИ», 2020

## ВВЕДЕНИЕ

Развитие ядерной энергетической системы является длительным и многостадийным процессом. Сложность этого процесса определяется необходимостью учёта не только значимых на сегодняшний день и ближайшую перспективу факторов, но и неопределённостью будущих условий развития системы общей энергетики и сроков освоения реакторных технологий и технологий ЯТЦ. В процесс анализа и принятия решений по развитию системы ядерной энергетики вовлекаются многие участники, часто с несовпадающими интересами. Актуальность, важность и интерес государства и бизнеса к освоению и внедрению технологий реакторов на быстрых нейтронах обуславливается тем, что в случае успешного развёртывания этих технологий появится возможность решения накопленных проблем существующей ядерной энергетики.

Поставленная перед ядерной отраслью задача по освоению технологий быстрых реакторов и замкнутого топливного цикла чрезвычайно трудна и имеет более чем 60-летнюю мировую не совсем успешную историю. Создание двухкомпонентной ядерной энергетической системы (ЯЭС) на базе ВВЭР и реакторов на быстрых нейтронах определено как ключевое направление в принятой Стратегии развития ядерной энергетики России до 2050 года и перспективы на период до 2100 года.

Цель работы состоит в проведении сравнительной многокритериальной оценки эффективности ядерно-энергетических двухкомпонентных систем с реакторами на тепловых и быстрых нейтронах (типа БН-1200) с замкнутым ЯТЦ и референтных систем реакторов на тепловых нейтронах с открытым ЯТЦ. Для реализации этой цели используется набор ключевых критериев, охватывающих экономику, экспортный потенциал, конкурентоспособность на внешних рынках, безопасное обращение с ОЯТ и РАО, потребление природного урана, а также технологический инновационный потенциал развития.

В данной работе методика многокритериального анализа (МКА) используется на конкретных постановочных задачах в совокупности с более глубоким исследованием вариантов двухкомпонентных систем. При проведении МКА исследуется влияние неопределённостей не только в весах и значениях критериев, но и в самих сценариях развития. Рассмотрены различные варианты двухкомпонентных систем, и проведён детальный анализ чувствительностей к значениям критериев, их весам и неопределённостям в потребностях развития ядерной энергетики.

## **1 Требования к разработке сценариев развития АЭ России с учётом минимизации объёмов ОЯТ, экономии природного урана и сокращения затрат на хранение плутония**

Никто точно не знает, как будет развиваться ЯЭ в стране, но предполагают, что она будет долговременной и сможет решить проблему энергообеспечения на длительный интервал времени. Такая энергетическая система должна быть безопасной, должна минимизировать отходы ЯЭ, избыточный плутоний и содействовать экспорту российских технологий. В системе должна просматриваться возможность её совершенствования (потенциал инноваций). Энергетическая система должна «переварить» то, что было сделано в прошлом в ЯЭ, в том числе решить накопленные (отложенные) проблемы и т. д. Для учёта поставленных требований в настоящее время предполагается, что в наибольшей степени для этих целей подходит двухкомпонентная система. Кроме того, система должна быть устойчива к «колебаниям» в потребностях. Это значит, что она должна справляться с разнообразием в темпах её развития. То есть система должна быть управляемой (гибкой и устойчивой).

Данные требования были сформулированы в [5], [8] и состоят в следующем:

- 1) потребительская привлекательность:
  - гарантированная безопасность,
  - экономическая эффективность;
- 2) масштабы производства на рынке электроэнергии — не менее 30 % к середине века;
- 3) структура энергопроизводства должна обеспечивать многоцелевое использование по областям применения, то есть расширение рынков сбыта и многокомпонентность как фактор гибкости и устойчивости к возможным рискам;
- 4) сырьевая база на российской территории не должна иметь ограничений на исторически значимый период времени (сотни лет);
- 5) обращение с отходами должно обеспечить безопасную окончательную изоляцию РАО.

Тактика и стратегия развития ЯЭС России [8]:

– Текущий этап:

- 1) наращивание ядерных энергетических мощностей на базе развития технологии ВВЭР как практической основы промышленной атомной энергетики на длительную перспективу;

2) создание и отработка базовых элементов новой технологической платформы по замыканию ЯТЦ, обеспечивающих минимизацию радиационной нагрузки при переработке ЯТ и изоляции РАО;

3) обеспечение роста экспорта референтных ядерных энерготехнологий;

4) исследование потребностей рынка для региональной ЯЭ малой и средней мощности и ее «неэлектрического» применения.

– Перспектива:

5) создание и развертывание замкнутой по урану и плутонию крупномасштабной ЯЭС как основы устойчивого развития России в средне- и дальнесрочной перспективе.

## **2 Приоритетные задачи ЯЭК России**

Приоритетные задачи ЯЭК России [8] состоят в следующем:

1) разработка требований и обоснований, выбор реактора(ов) на быстрых нейтронах как базового элемента замкнутого ЯТЦ (воспроизводство топлива, время внешнего топливного цикла по плутонию, безопасность, экономика, этапность, сроки реализации);

2) НИОКРы по новым технологиям ЯТЦ (топливо, методы изготовления и переработки ЯТ, трансмутация МА);

3) системное моделирование развития ЯЭ России для оценки приоритетных направлений инноваций (временные рамки, масштабы, технические требования);

4) разработка методов оценки нейтронной эффективности системы ЯЭ, прогноз нейтронной эффективности доступного в перспективе топлива;

5) разработка методов оптимального управления нуклидным составом ядерного топлива на всех переделах замкнутого ЯТЦ.

В рамках работы [9] были сформулированы цели и задачи для моделирования этапов реализации вариантов замкнутого ЯТЦ в ЯЭС России:

1) значительное сокращение запасов ОЯТ ВВЭР в системе на первом этапе до 2050 года;

2) максимальная утилизация ОЯТ на втором этапе до 2100 года;

3) максимальное использование энергетического потенциала перерабатываемого ОЯТ;

4) управление воспроизводством топлива в ЯЭС при отсутствии потребностей в резком росте энергопроизводства (воспроизводство топлива соответствует темпу роста/спада энергетических мощностей);

5) требования к сценариям:

– при любом сценарии развития используется модель отсутствия накопления избыточного выделенного плутония в системе — долгосрочная сбалансированность системы;

– минимизация потребления природного урана.

### **3 Выбор модельных сценариев развития ЯЭС РФ в условиях неопределённости знаний о будущем и их анализ**

В настоящее время ввиду большого количества фактов, как объективных, так и субъективных, невозможно сколько-нибудь определённо и уверенно предсказать направление будущего развития ЯЭ России на длительный период времени, но можно рассмотреть вероятные тенденции развития. В этих условиях представляется полезным выполнить исследование по сравнению ряда модельных сценариев развития ЯЭ России, моделирующих широкий спектр возможных тенденций ее развития. Можно условно выделить три группы сценариев.

Первая группа — это растущие сценарии, в которых количество блоков и их суммарная мощность со временем растут. На сегодняшний день не существует возможности предсказать, с каким темпом будет происходить рост мощностей и будет ли производная изменения мощности по времени весь рассматриваемый период положительной. Однако для упрощения будем предполагать её положительность. Будем рассматривать и сравнивать референтный сценарий с реакторами на тепловых нейтронах в открытом топливном цикле с двухкомпонентными сценариями с разными временами начала ввода серии реакторов на быстрых нейтронах. В первом случае в двухкомпонентном сценарии будет моделироваться вариант «своевременного» ввода реакторов на быстрых нейтронах, а во втором варианте будет реализована «задержка» по времени ввода быстрых реакторов. Сценарий своевременного ввода реакторов на быстрых нейтронах в дальнейшем мы будем называть «базовым». Таким образом, в группе сценариев роста ЯЭ России будет рассмотрено 3 сценария: референтный (Ref), двухкомпонентный с быстрыми и тепловыми реакторами (Base) и двухкомпонентный с задержкой ввода быстрых реакторов на 35 лет (Delay). Сценарии этой группы в дальнейшем называются растущими.

Вторая группа сценариев предполагает, что после некоторого периода роста мощностей произойдёт выход на стационарный уровень, в котором не будет изменения суммарной установленной мощности системы во времени. Внутри этой группы также будет три сценария с одинаковым изменением

установленных мощностей. Первый — референтный, с реакторами на тепловых нейтронах. Другие два — двухкомпонентные, по аналогии с предыдущей группой со своевременным и отложенным вводом быстрых реакторов. Обозначения на графиках и таблицах: RefS, BaseS и DelayS соответственно. Сценарии этой группы в дальнейшем называются стационарными.

Третья группа сценариев моделирует снижение установленных мощностей ядерной энергетики внутри страны после некоторого их роста. В группе также предполагается три сценария, как и в предыдущих двух. Сценарии этой группы в дальнейшем называются «падающие» сценарии.

На рис. 1 приведены изменения установленных мощностей для модельных сценариев, исследуемых в данной работе. Каждая из линий показывает установленные мощности, достигаемые ЯЭС отдельно взятой группы сценариев с использованием набора соответствующих реакторных технологий, предприятий производства, переработки и хранения топлива.

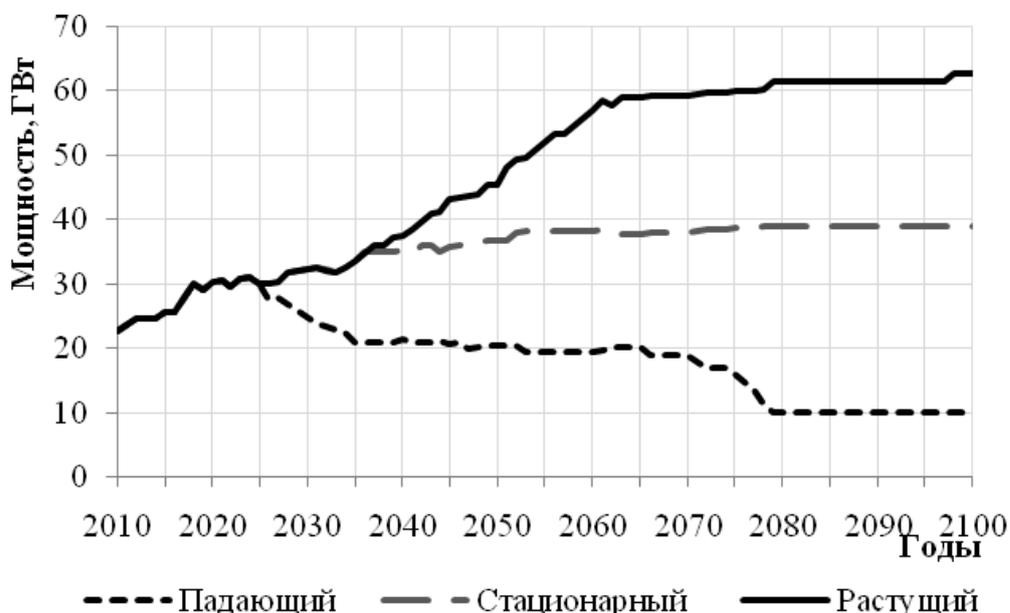


Рис. 1. Изменения установленных мощностей для групп исследуемых сценариев

При построении сценариев в данном исследовании приняты следующие условия:

- горизонт моделирования ЯЭС — до 2100 года;
- желательна максимально возможная утилизация запасов ОЯТ в двухкомпонентной (базовые сценарии) системе к 2100 году;
- запасы доступного природного урана, которые должны обеспечивать работу парка тепловых реакторов, ограничены 500 тыс. т и не распределены по группам стоимостей;

– плутоний от переработки ОЯТ складировается, а затем расходуется на топливообеспечение, ежегодная переработка ОЯТ осуществляется по потребности в плутонии, баланс выделенного плутония в системе не должен превышать ~100 тонн, избыточный выделенный плутоний не накапливается в системе;

– регенерированный уран не рециклируется;

– структура парка реакторов и соотношение между количествами реакторов различного типа выбираются исходя из требования достижения заданных установленных мощностей (УМ) в сценариях к концу рассматриваемого периода. В настоящем исследовании целевыми значениями УМ ЯЭС являются 62 ГВт, 39 ГВт и 11 ГВт соответственно для растущего, стационарного и падающего сценариев.

### 3.1 Набор ключевых критериев для многокритериального анализа

При выполнении МКА использовался набор ключевых критериев, описанный ранее в работах [10], [11]. Данный набор, приведенный в таблице 1, соответствует требованиям к разработке сценариев развития АЭ России с учётом минимизации объёмов ОЯТ, экономии природного урана и сокращения затрат на хранение плутония. В этой же таблице приведены на качественном уровне неопределённости значений соответствующих индикаторов.

Таблица 1. Набор ключевых критериев

| Критерий                        | Неопределённость |
|---------------------------------|------------------|
| 1. Экономика                    | Высокая          |
| 2. Обращение с ОЯТ и РАО        | Низкая           |
| 3. Потребление природного урана | Низкая           |
| 4. Нарработка плутония          | Низкая           |
| 5. Экспортный потенциал         | Умеренная        |

На первом этапе при проведении МКА полагалось, что все пять критериев имеют одинаковую важность. То есть все критерии имели одинаковый вес 20 %. Оценка влияния такого допущения на результаты МКА будет проведена в разделе 4.

### 3.2 Группа растущих сценариев и их анализ

В данной группе рассматриваются сценарии развития ЯЭ с достижением уровня установленной мощности ЯЭС 62 ГВт к 2100 году на основе комплексного использования существующих и инновационных технологий в базовом сценарии:

Ref — референтный сценарий без ввода быстрых реакторов. Развитие основывается на усовершенствованных эволюционных реакторах ВВЭР;

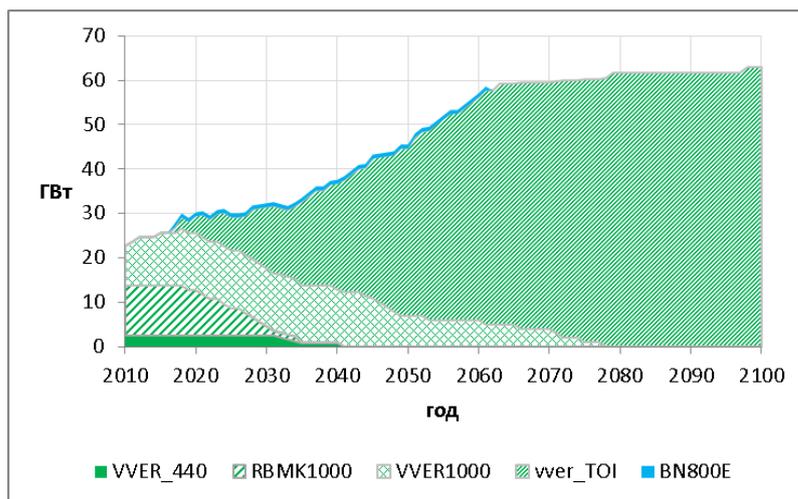
Base — базовый сценарий — внедрение технологии быстрых натриевых реакторов с серийным вводом после 2028 г. энергоблоков БН-1200, а также инновационных реакторов ВВЭР-С (УОКС) с 2036 года и ВВЭР-С (МОКС) с 2047 года;

Delay — сценарий с задержкой коммерческого ввода энергоблоков БН-1200 на 35 лет, то есть с вводом в эксплуатацию с 2063 г.

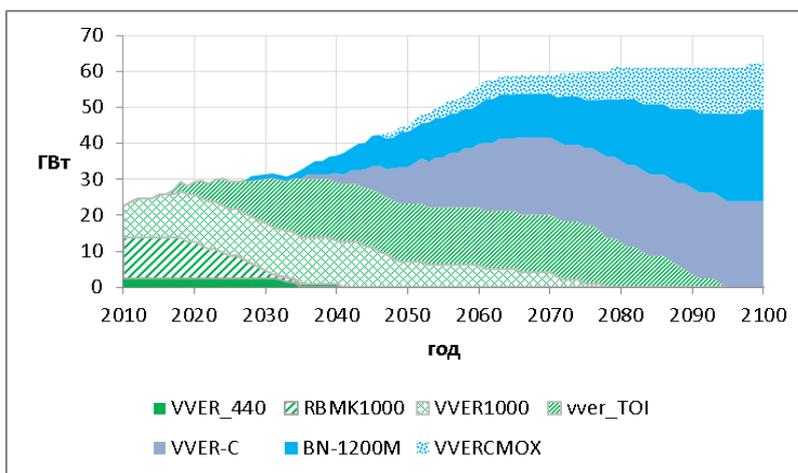
Для каждого из указанных выше сценариев динамика роста вводимых мощностей одинаковая.

На рисунке 2 приведены структуры установленных мощностей для группы растущих сценариев. А на рисунках 3 и 4 приведены, соответственно, ежегодное потребление природного урана и сравнение ежегодного потребления природного урана в группе растущих сценариев.

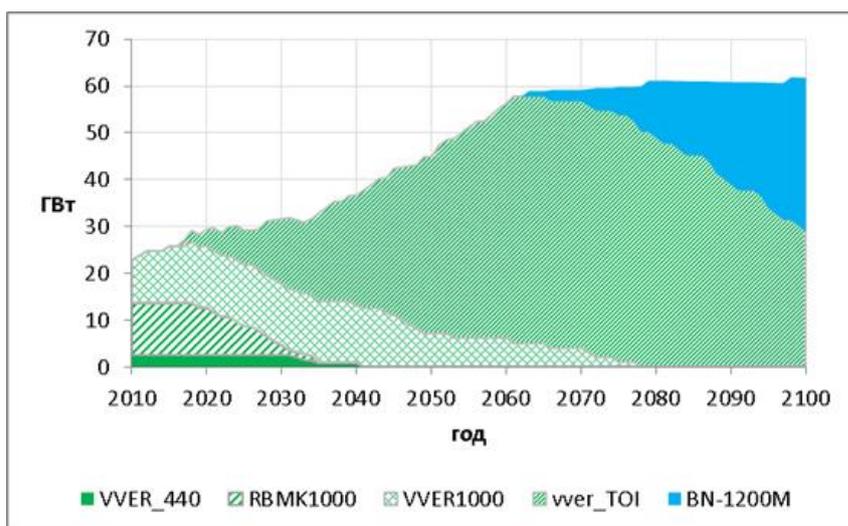
На рисунке 5 приведено сравнение накопления плутония в системе для группы растущих сценариев. На рисунках 6 и 7 приведено соответственно накопление ОЯТ и сравнение накопления ОЯТ для группы растущих сценариев.



а) референтный сценарий ЯЭ

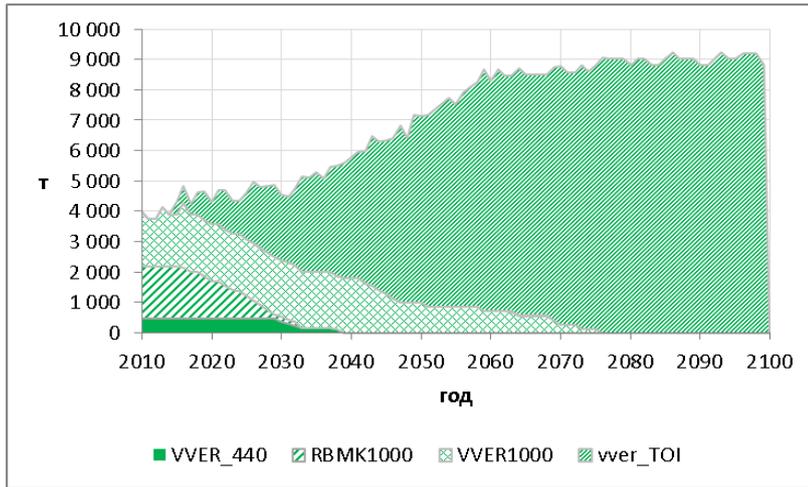


б) базовый сценарий — своевременное внедрение быстрых натриевых реакторов

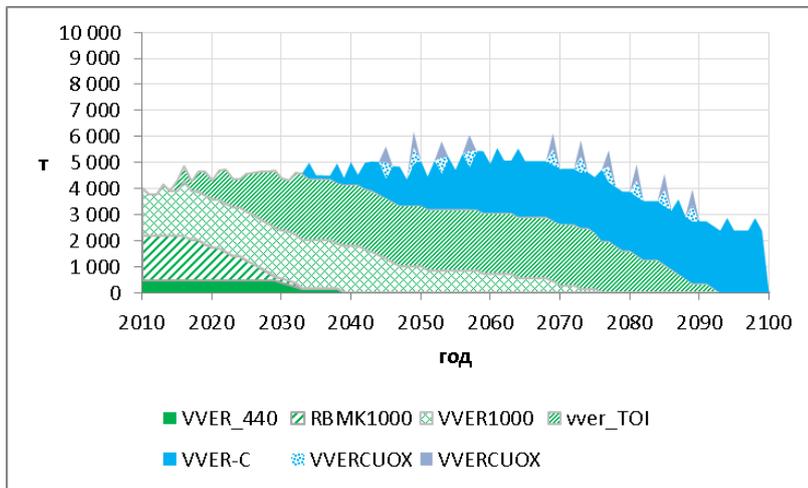


в) сценарий с задержкой ввода энергоблоков БН-1200 на 35 лет

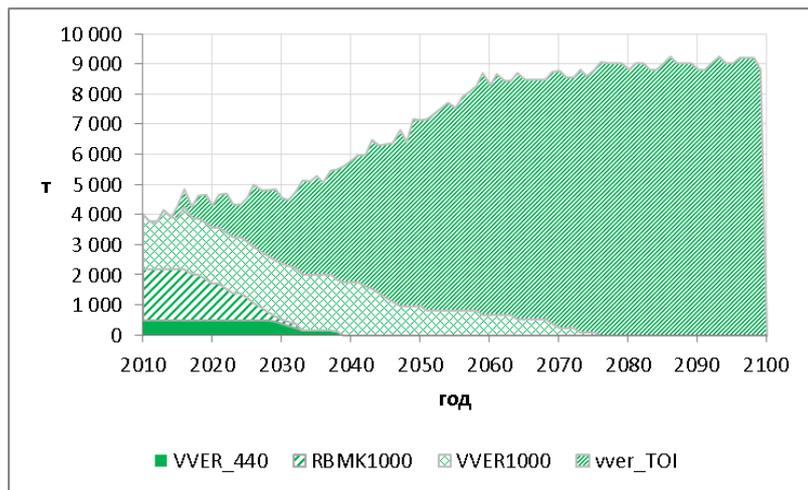
Рис. 2. Структуры установленных мощностей для группы растущих сценариев



а) референтный сценарий без ввода быстрых реакторов



б) базовый сценарий



в) сценарий с задержкой коммерческого ввода энергоблоков БН-1200 на 35 лет

Рис. 3. Ежегодное потребление природного урана в группе растущих сценариев (по типам реакторов)

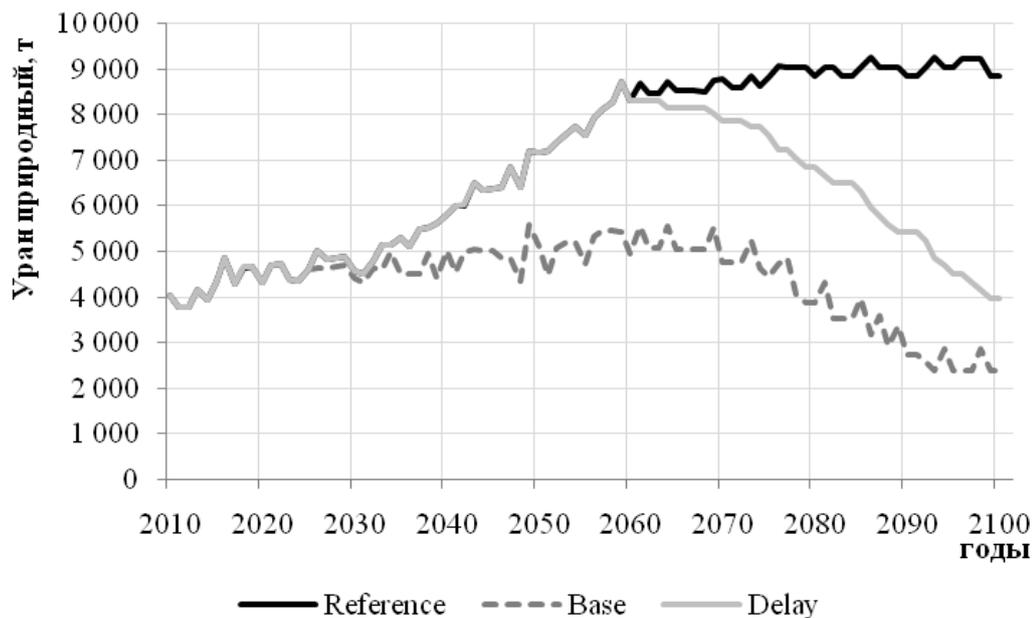


Рис. 4. Сравнение ежегодного потребления природного урана в группе растущих сценариев

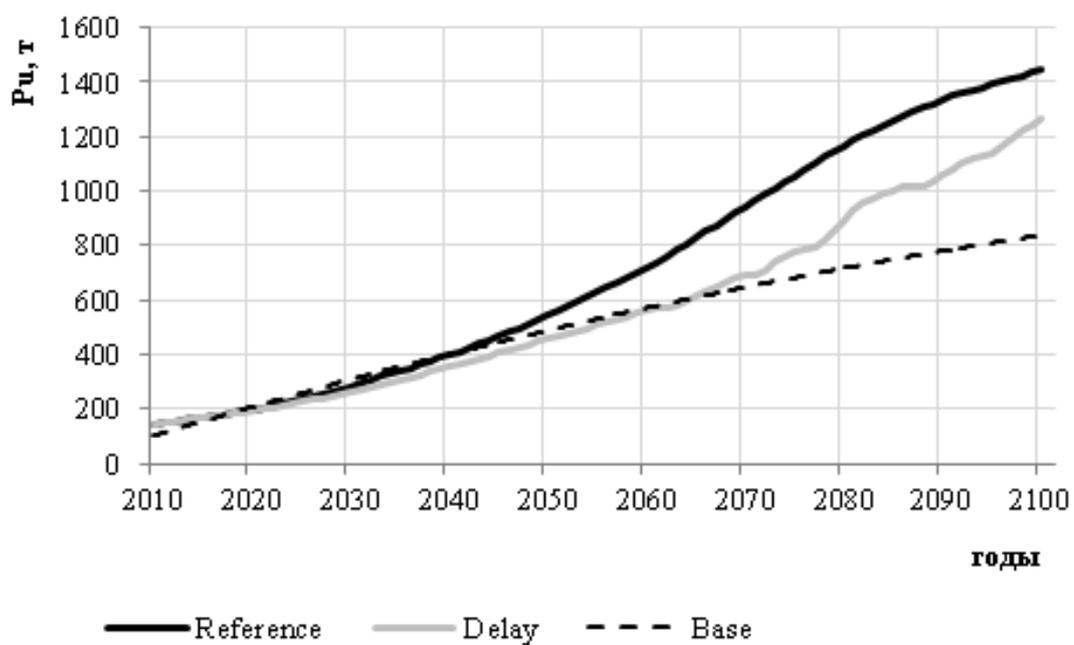
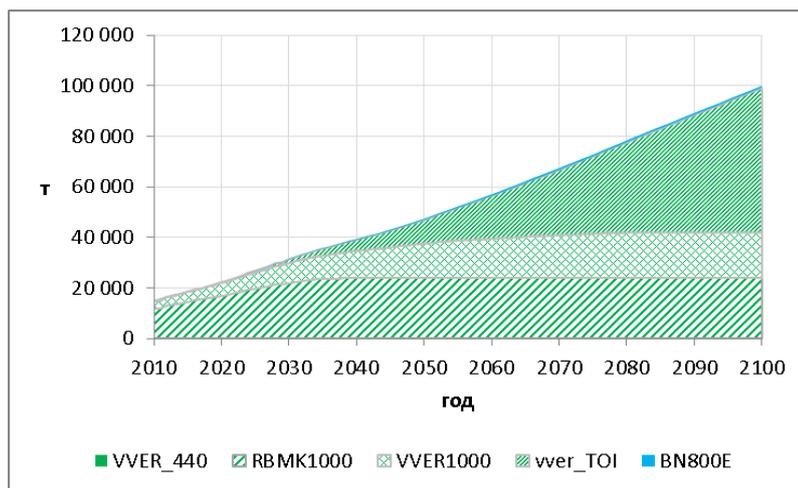
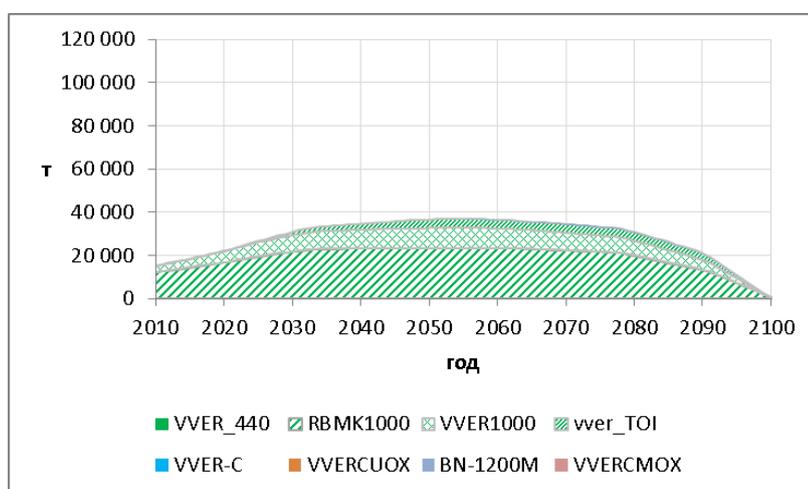


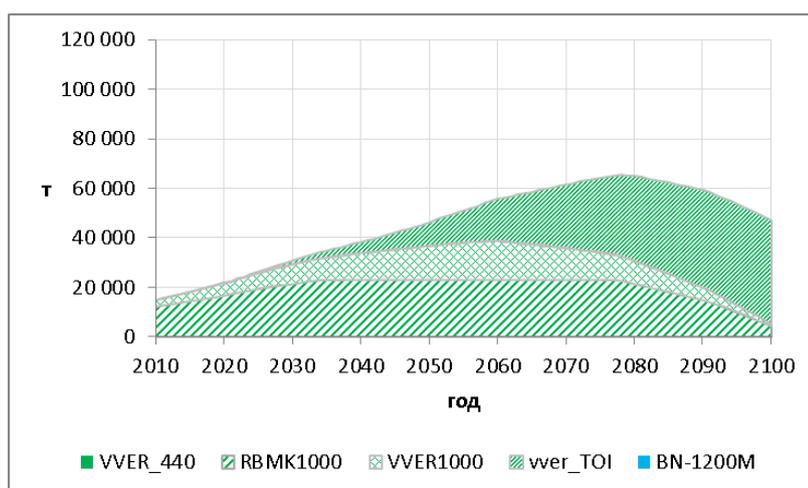
Рис. 5. Накопление плутония во внешнем топливном цикле ЯЭС



а) референтный сценарий



б) базовый сценарий — нефорсированное внедрение технологии быстрых натриевых реакторов



в) Сценарий с задержкой коммерческого ввода энергоблоков БН-1200 на 35 лет

Рис. 6. Накопление ОЯТ для группы растущих сценариев

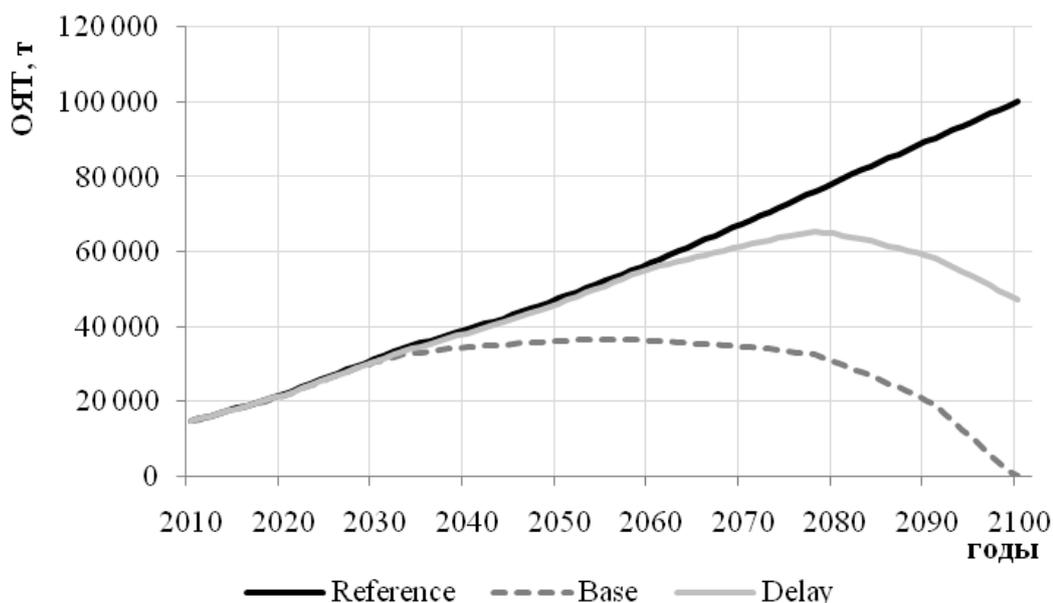


Рис. 7. Сравнение накопления ОЯТ, группа растущих сценариев

Анализ результатов рисунков 3 и 4 показывает, что интегральное и ежегодное потребление природного урана существенно снижается в двухкомпонентном базовом сценарии по сравнению с референтным сценарием и сценарием с отложенным вводом быстрых реакторов.

Сравнение накопления плутония во внешнем топливном цикле (рис. 5) показывает, что рост количества плутония для двухкомпонентных сценариев ниже, чем для референтного, и стабилизируется для двухкомпонентного сценария со своевременным вводом быстрых реакторов. При этом во всех растущих сценариях баланс выделенного плутония в системе не превышает 100 т.

Результаты сравнения по накоплению ОЯТ (рис. 7) показывают, что в референтном сценарии количество ОЯТ к концу века достигает почти ста тысяч тонн. В двухкомпонентном базовом сценарии количество ОЯТ снижается до нуля. Сценарий с задержкой ввода показывает лучшие результаты по сравнению с референтным сценарием, но хуже, чем в базовом сценарии.

### **Сравнительный многокритериальный анализ для растущих сценариев**

Многокритериальный анализ проводился для трех периодов: до 2050, 2070 и 2100 годов. Для этих периодов в таблице 2 приведены объёмы ОЯТ и количества потреблённого природного урана и накопленного плутония для группы растущих сценариев. Критерии по этим характеристикам строились с использованием приведённой в таблице 2 информации.

Таблица 2. Объёмы ОЯТ, количества потреблённого природного урана и накопленного в системе плутония для группы сценариев высокого развития ЯЭ России

| Сценарий    | <sup>nat</sup> U, т | Накопленный Pu, т | Объём ОЯТ, т |
|-------------|---------------------|-------------------|--------------|
| К 2050 году |                     |                   |              |
| Ref         | 211 387             | 546               | 47 413       |
| Base        | 188 332             | 507               | 36 331       |
| Delay       | 211 387             | 458               | 46 352       |
| К 2070 году |                     |                   |              |
| Ref         | 384 709             | 966               | 68 545       |
| Base        | 296 092             | 730               | 34 603       |
| Delay       | 379 545             | 695               | 62 185       |
| К 2100 году |                     |                   |              |
| Ref         | 636 451             | 1 451             | 99 997       |
| Base        | 394 102             | 970               | 326          |
| Delay       | 547 837             | 1 264             | 47 233       |

Здесь и далее под накопленным в системе плутонием понимается плутоний, наработанный всеми реакторами и содержащийся как в ОЯТ, так и выделенный плутоний в системе.

На рисунках 8—10 приведены результаты сравнения рейтингов ЯЭС растущего сценария на разные периоды времени. В результатах содержатся вклады в итоговую оценку от всех рассматриваемых критериев.

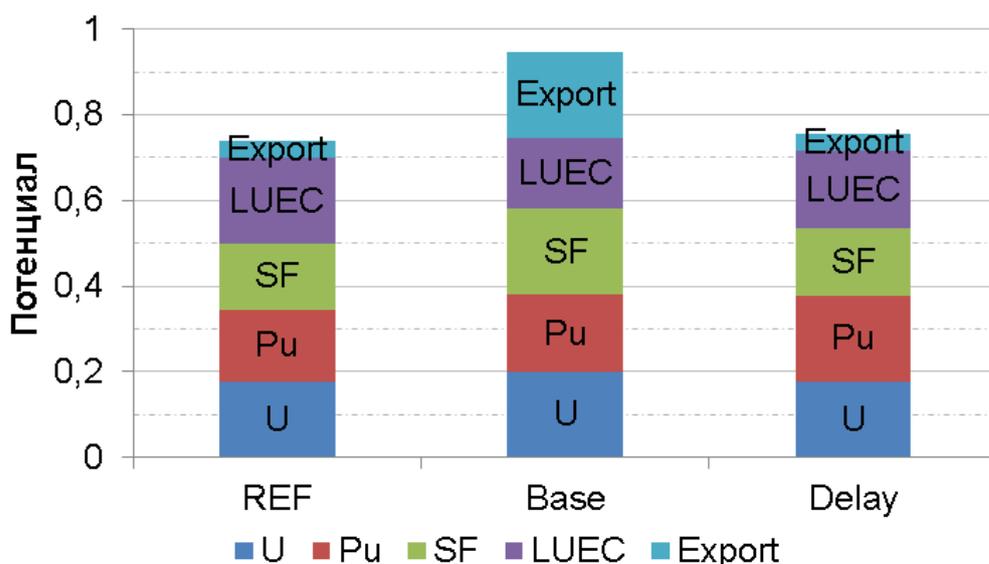


Рис. 8. Рейтинги альтернативных ЯЭС на 2050 год, группа растущих сценариев ЯЭ России

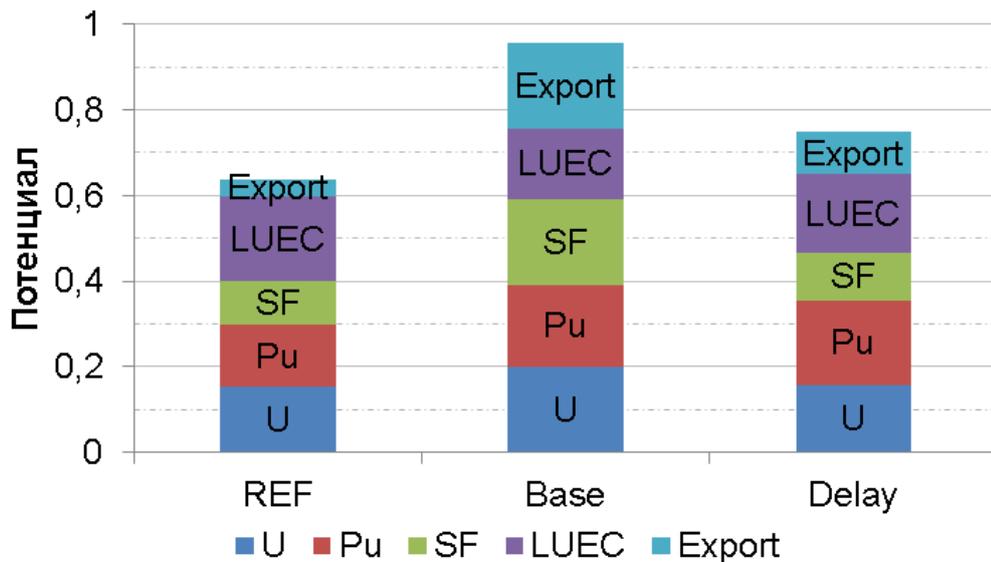


Рис. 9. Рейтинги альтернативных ЯЭС на 2070 год, группа растущих сценариев ЯЭ России

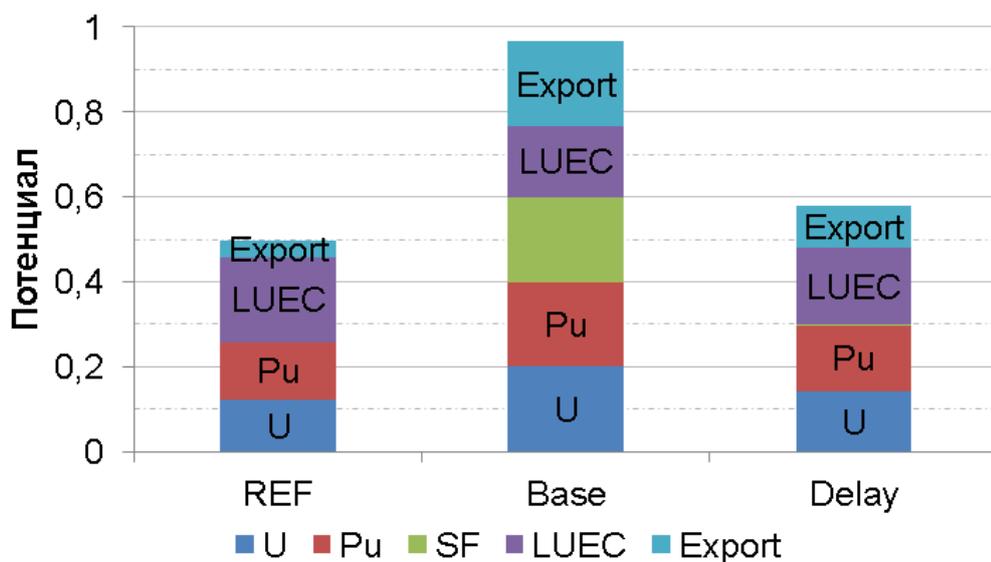


Рис. 10. Рейтинги альтернативных ЯЭС на 2100 год, группа растущих сценариев ЯЭ России

Здесь и далее экономический критерий строился исходя из модельных приближений через экспертную оценку удельной стоимости производства электроэнергии — значения величины LCOE. При этом использовался консервативный подход, при котором полагалось, что референтная система по этому критерию будет лучше, чем двухкомпонентная. Вначале предполагалось, что эта разница будет 20 % в пользу референтной. Далее эта разница изменялась в сторону ухудшения двухкомпонентной системы.

При построении критерия экспорта (Export) полагалось, что по трехбалльной системе по этому критерию референтная ЯЭС соответствует 2 баллам, двухкомпонентная ЯЭС со своевременным вводом быстрых реакторов — 3 баллам, а система с задержкой ввода по этому критерию — 2,5 баллам. Объяснение такому распределению баллов состоит в следующем: обязательства по экспорту для всех рассматриваемых систем одинаковы, но двухкомпонентные системы лучше референтной по обращению с ОЯТ (SF) и накоплению плутония (Pu), причем двухкомпонентная ЯЭС со своевременным вводом быстрых реакторов превосходит систему с задержкой ввода.

Результаты многокритериального анализа для всех временных интервалов данной группы (в соответствии с рис. 8—10) показали существенно более высокий рейтинг для двухкомпонентной системы со своевременным вводом быстрых реакторов. Вариант с отложенным вводом быстрых реакторов имеет более низкий рейтинг среди двухкомпонентных ЯЭС, но более высокий по сравнению с референтной системой.

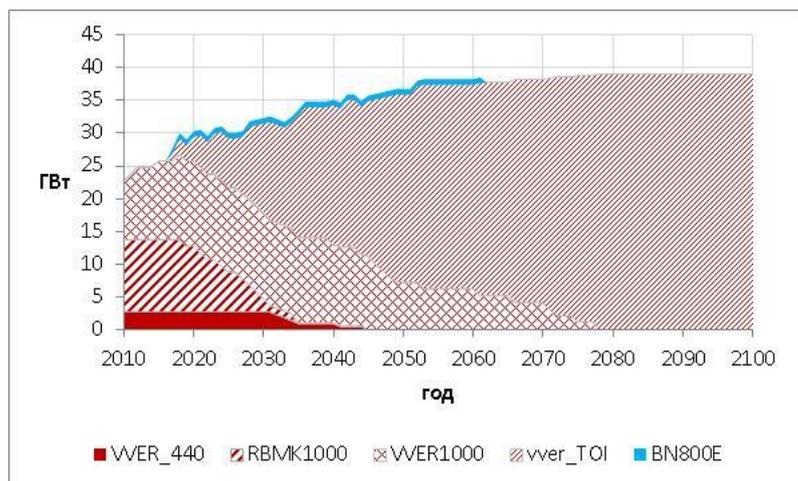
### **3.3 Группа стационарных сценариев и их анализ**

В данной группе рассматриваются сценарии развития ЯЭ с достижением уровня установленной мощности ЯЭС 39 ГВт к 2100 году на основе комплексного использования существующих и инновационных технологий в базовом сценарии.

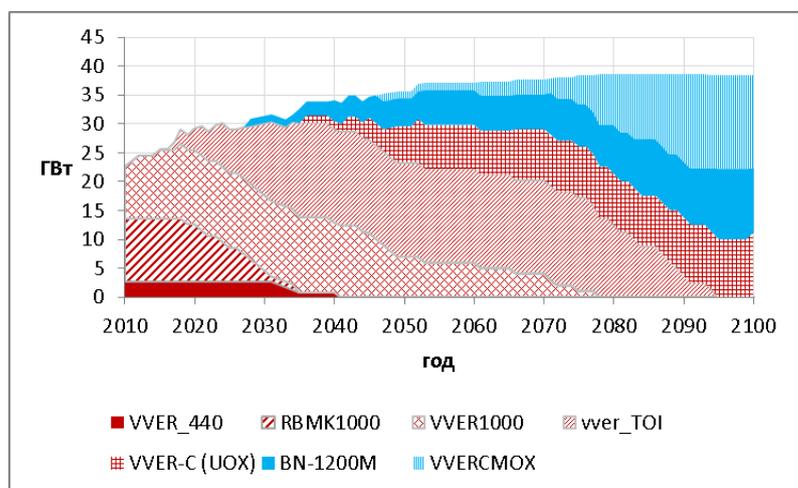
Характеристики референтного сценария, базового сценария и сценария с задержкой ввода быстрых реакторов такие же, как в группе растущих сценариев. Обозначения для стационарных сценариев: RefS, BaseS и DelayS, соответственно, для референтного, базового и с запаздыванием.

Для каждого из описанных выше сценариев динамика роста вводимых установленных мощностей одинаковая. На рисунках 11—13 приведены соответственно структуры установленных мощностей для рассматриваемой группы стационарных сценариев, ежегодное потребление природного урана для этой группы и сравнение ежегодного потребления природного урана в группе стационарных сценариев.

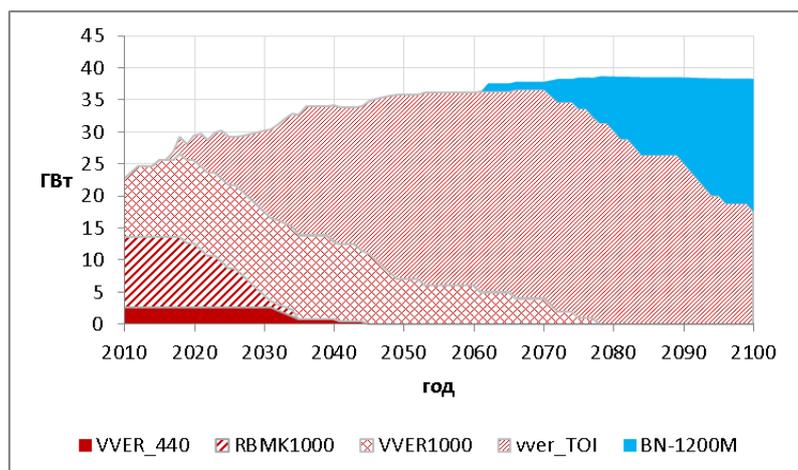
На рисунке 14 приведено сравнение накопления плутония в системе для группы стационарных сценариев. А на рисунках 18 и 19 приведено накопление ОЯТ и сравнение накопления ОЯТ для группы стационарных сценариев.



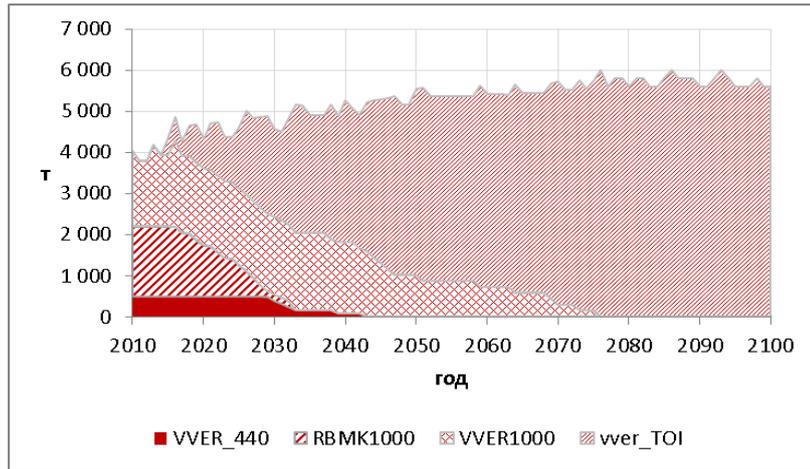
а) референтный сценарий без ввода быстрых реакторов



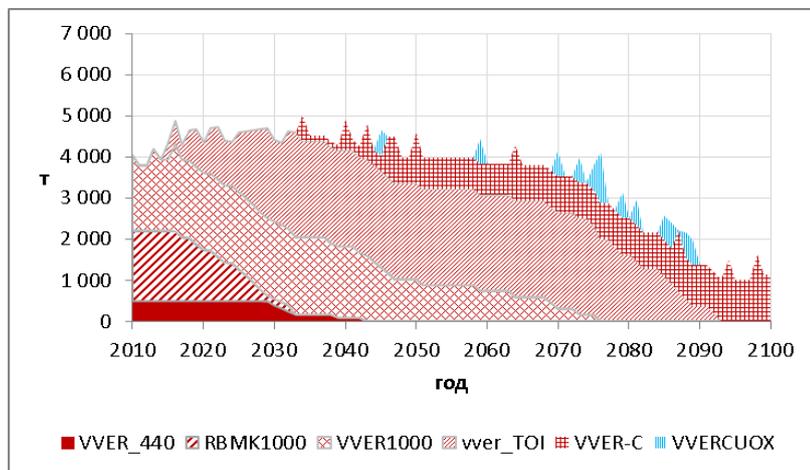
б) базовый сценарий: нефорсированное внедрение технологии быстрых натриевых реакторов



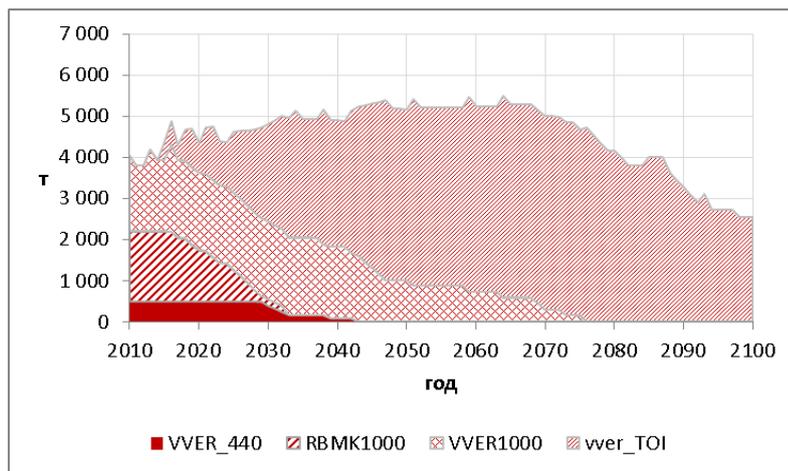
в) сценарий с задержкой коммерческого ввода энергоблоков БН-1200 на 35 лет  
 Рис. 11. Структуры установленных мощностей для группы стационарных сценариев ЯЭ России



а) референтный сценарий без ввода быстрых реакторов



б) базовый сценарий – нефорсированное внедрение технологии быстрых натриевых реакторов



в) сценарий с задержкой коммерческого ввода энергоблоков БН-1200 на 35 лет

Рис. 12. Ежегодное потребление природного урана для группы стационарных сценариев ЯЭ России

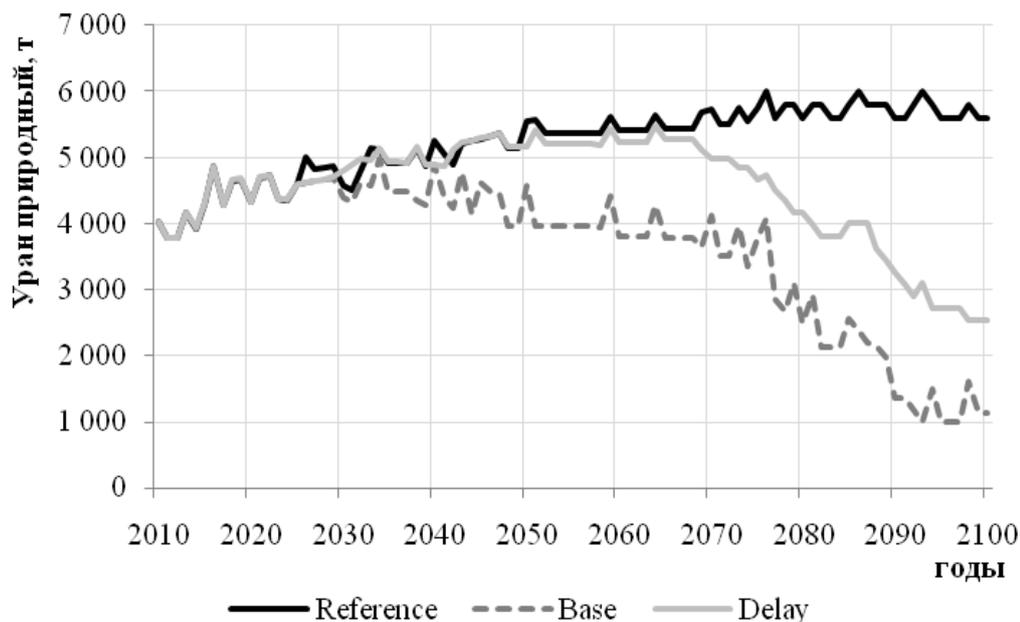


Рис. 13. Сравнение ежегодного потребления природного урана, группа стационарных сценариев ЯЭ России

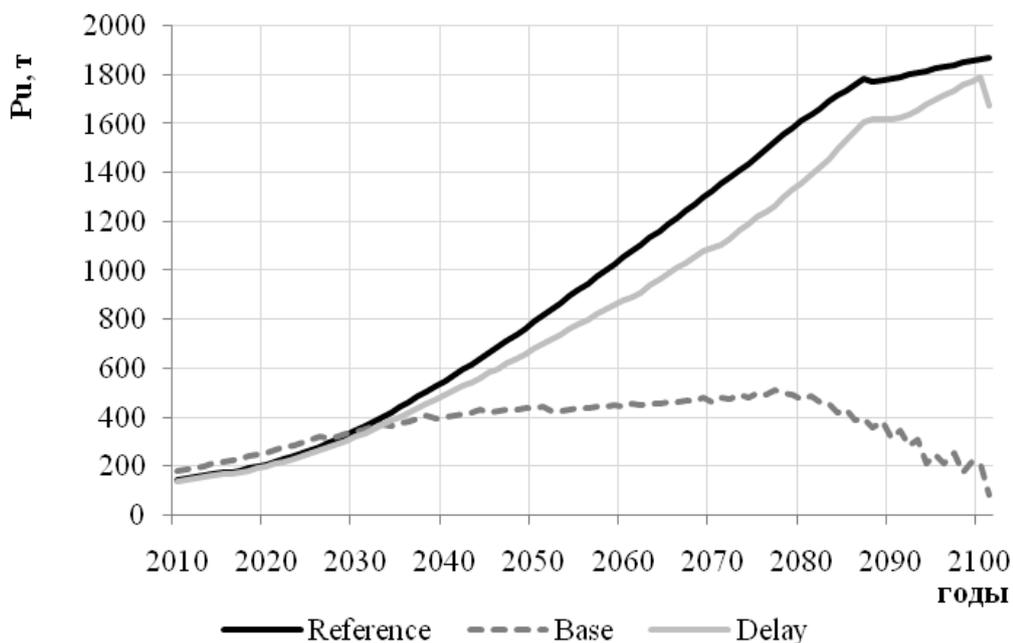
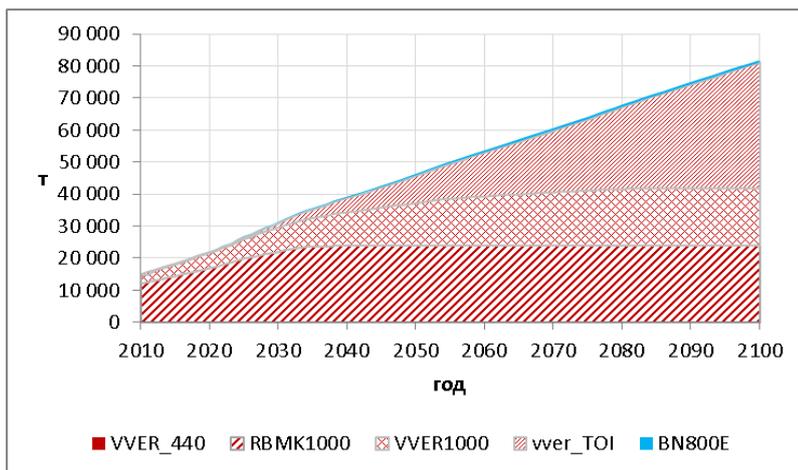
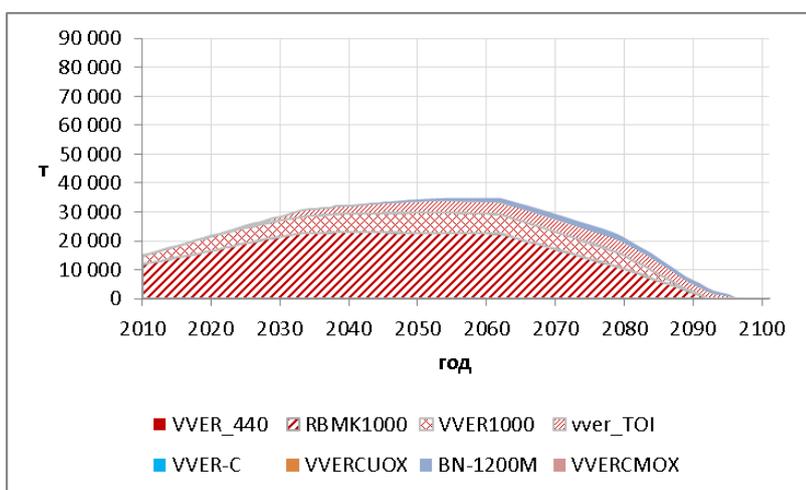


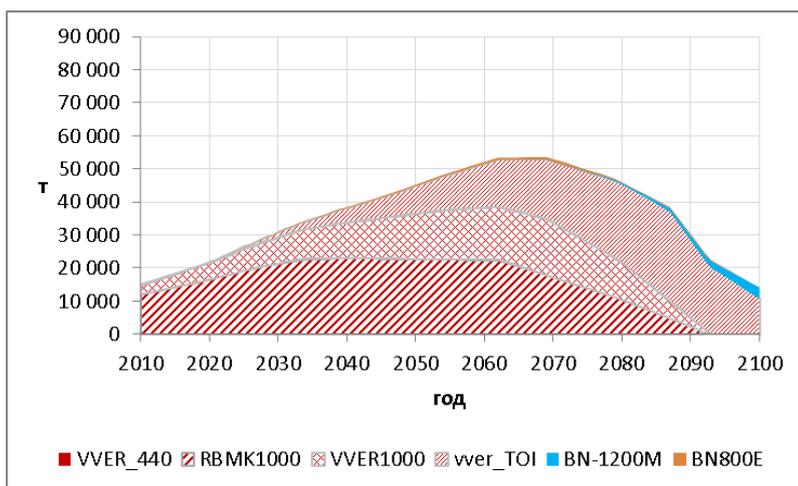
Рис. 14. Накопление плутония в системе для группы сценариев стационарного развития ЯЭ России



а) референтный сценарий без ввода быстрых реакторов



б) базовый сценарий: своевременное внедрение технологии быстрых натриевых реакторов



в) сценарий с задержкой коммерческого ввода энергоблоков БН-1200 на 35 лет

Рис. 15. Накопление ОЯТ в системе для группы стационарных сценариев ЯЭ России

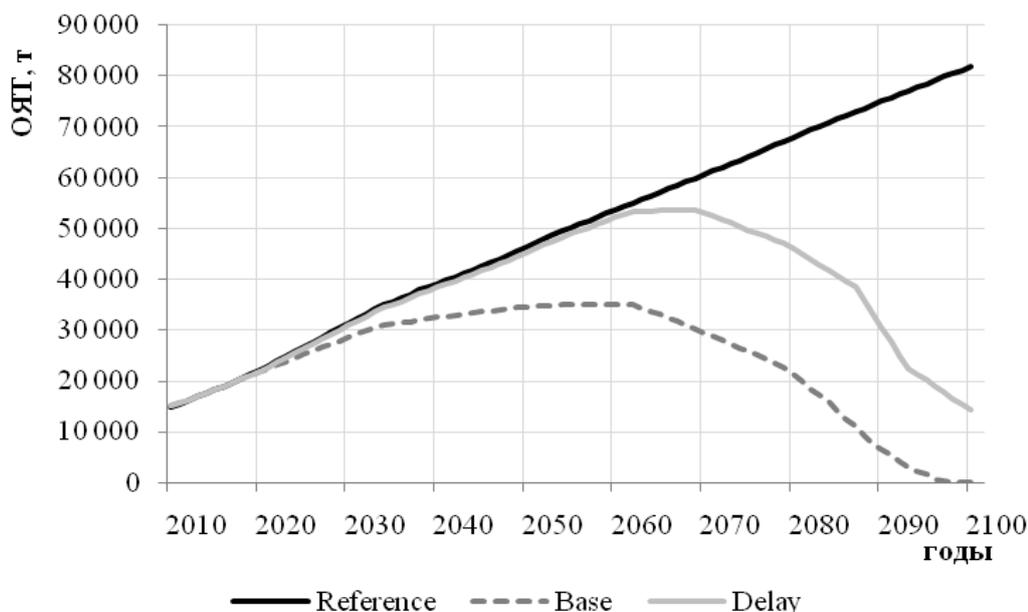


Рис. 16. Сравнение накопления ОЯТ для группы сценариев стационарного развития ЯЭ России

Анализ результатов рисунков 12 и 13 показывает, что ежегодное потребление природного урана существенно снижается в двухкомпонентном базовом сценарии по сравнению с референтным ОЯТЦ и сценарием с отложенным вводом быстрых реакторов.

Сравнение накопления плутония в группе стационарных сценариев (рис. 14) показывает, что рост количества плутония для двухкомпонентных сценариев ниже, чем для референтного, и существенно ниже для двухкомпонентного сценария со своевременным вводом быстрых реакторов. При этом в указанной группе баланс выделенного плутония в системе не превышает 100 т.

Результаты сравнения накопления ОЯТ (рис. 15 и 16) показывают, что в референтном сценарии количество ОЯТ к концу века достигает почти ста тысяч тонн. В двухкомпонентном базовом сценарии количество ОЯТ снижается до 0. Сценарий с задержкой ввода быстрых реакторов показывает лучшие результаты по сравнению с референтным сценарием, но хуже, чем в базовом сценарии.

### **Сравнительный многокритериальный анализ группы стационарных сценариев**

Многокритериальный анализ проводился для трех временных периодов: до 2050, 2070 и 2100 года. В таблице 3 приведены объёмы ОЯТ, количества потреблённого природного урана и накопленного плутония для

группы стационарных сценариев. Критерии по этим характеристикам строились с использованием приведённой в таблице 3 информации.

При построении критериев для группы стационарных сценариев использовались те же приближения, что и для группы растущих сценариев.

Таблица 3. Объёмы ОЯТ, количества потреблённого природного урана и накопленного в системе плутония для группы стационарных сценариев

| Сценарий    | $^{nat}U$ , т | Накопленный Pu, т | Объём ОЯТ, т |
|-------------|---------------|-------------------|--------------|
| К 2050 году |               |                   |              |
| RefS        | 195 618       | 791               | 46 300       |
| BaseS       | 181 883       | 441               | 34 369       |
| DelayS      | 194 507       | 679               | 45 210       |
| К 2070 году |               |                   |              |
| RefS        | 310 450       | 1 355             | 61 334       |
| BaseS       | 264 038       | 481               | 28 668       |
| DelayS      | 304 232       | 1 102             | 52 423       |
| К 2100 году |               |                   |              |
| RefS        | 476 396       | 1 867             | 81 853       |
| BaseS       | 327 888       | 210               | 0            |
| DelayS      | 410 434       | 1 790             | 14 197       |

На рисунках 17—19 приведены результаты сравнения потенциалов ЯЭС стационарного сценария на разные периоды времени. В результатах содержатся вклады в итоговую оценку от всех рассматриваемых критериев.

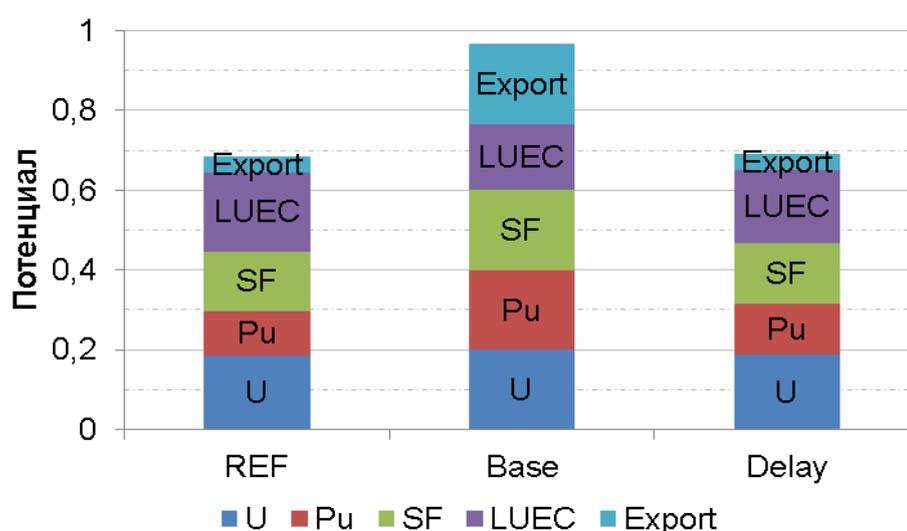


Рис. 17. Рейтинги альтернативных ЯЭС на 2050 год, группа стационарных сценариев ЯЭ России

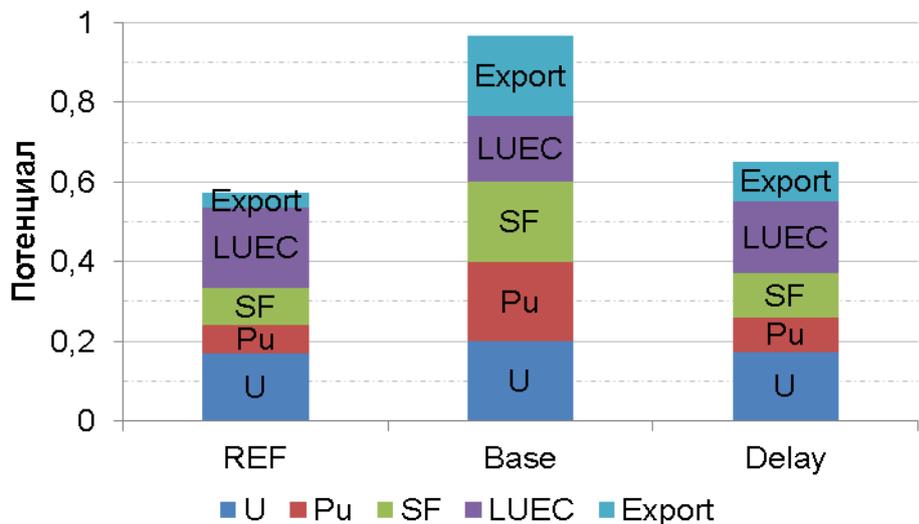


Рис. 18. Рейтинги альтернативных ЯЭС на 2070 год, группа стационарных сценариев ЯЭ России

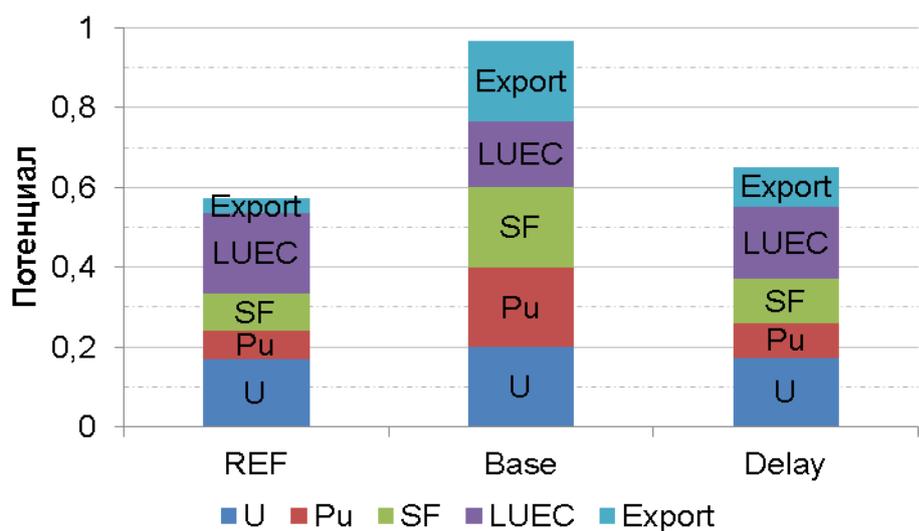


Рис. 19. Рейтинги альтернативных ЯЭС на 2100 год, группа стационарных сценариев ЯЭ России

Результаты многокритериального анализа для всех вариантов данной группы показали более высокий рейтинг для двухкомпонентной системы. ЯЭС с отложенным вводом быстрых реакторов имеет более низкий рейтинг.

### 3.4 Группа падающих сценариев и их анализ

В данной группе рассматривается гипотетический сценарий с существенным уменьшением установленной мощности ЯЭ. Сценарий построен на основе использования только существующих технологий тепловых и быстрых реакторов с прекращением после 2020 года ввода тепловых и разработок перспективных реакторов с обеспечением уровня установленной мощности ЯЭС 11 ГВт к 2100 году. Условие утилизации запасов ОЯТ тепловых реакторов в базовом сценарии достигается серийным вводом реакторов БН-800.

«RefL» — референтный сценарий, основанный на вводе ВВЭР-1200/ТОИ с вводом в 2016 году быстрого реакторов БН-800;

«BaseL» — сценарий серийного ввода БН-800: до 2100 года вводятся 12 реакторов БН-800;

«DelL» — сценарий с задержкой коммерческого ввода серии БН-800 на 35 лет, то есть с вводом серийных БН-800 с 2063 года.

Для каждого из описанных в данной группе сценариев динамика установленных мощностей одинаковая. В этой группе сценариев полагалось, что ситуация с ядерной энергетикой столь плоха, что было принято решение не развивать новые технологии ВВЭР и БН-1200, а обойтись использованием уже разработанного варианта БН-800 с реализацией на нём замыкания ЯТЦ.

Безусловно, это граничный вариант с отказом от развития ЯЭ и необходимостью сокращения (здесь как раз остаётся ОЯТ БН!) ОЯТ, плутония и РАО. При этом предполагается использование только готовых решений.

На рисунках 20—22 соответственно приведены структуры установленных мощностей энергоблоков для группы падающих сценариев, ежегодное потребление природного урана для этой группы и сравнение ежегодного потребления природного урана в группе падающих сценариев.

На рисунке 23 приведено сравнение накопления плутония в системе для группы падающих сценариев. А на рисунках 24—25 приведено соответственно накопление ОЯТ и сравнение накопления ОЯТ для группы падающих сценариев.

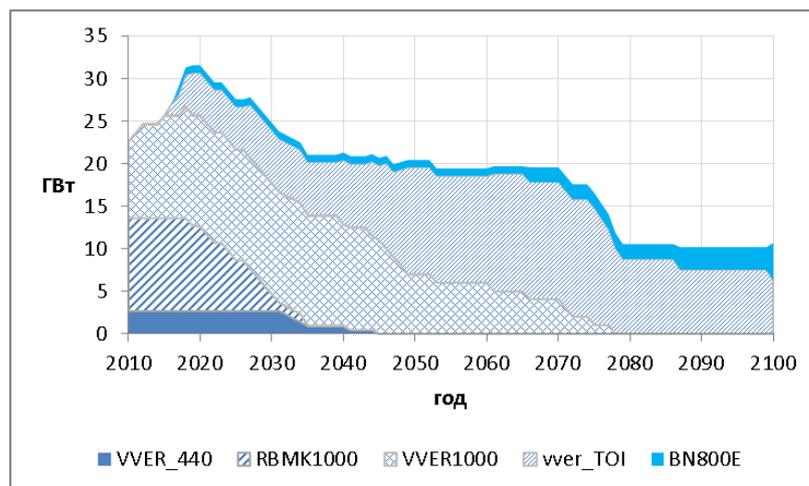
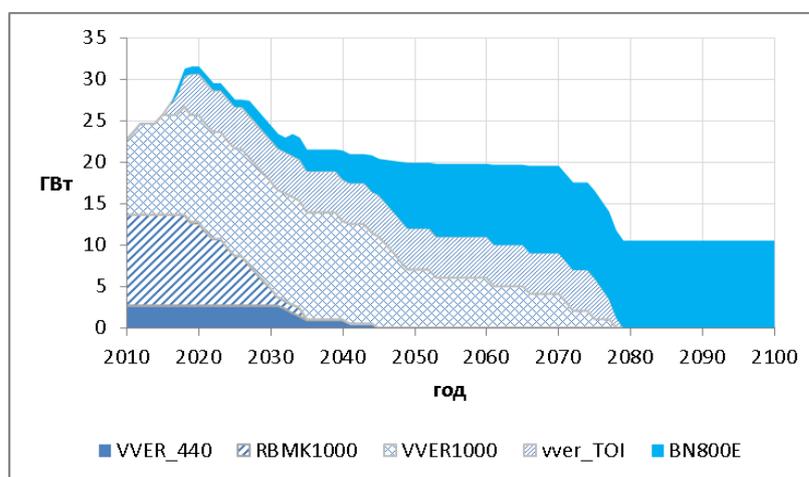
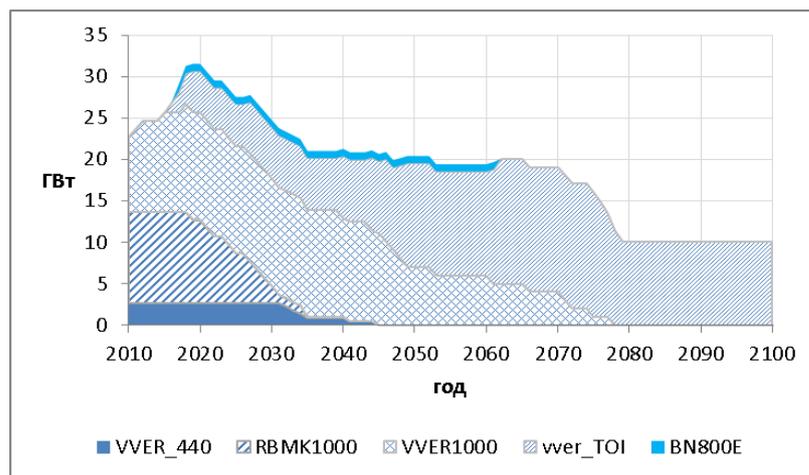
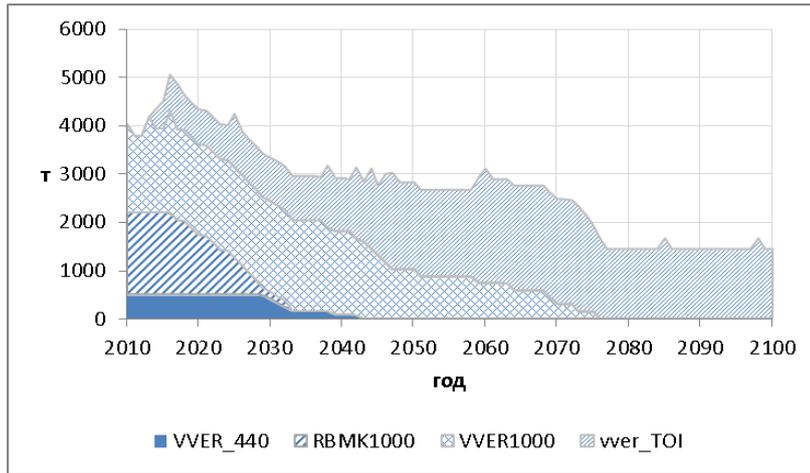
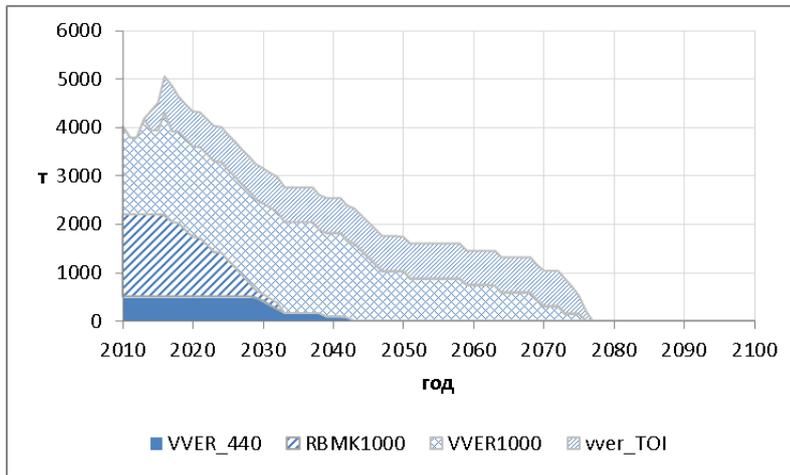


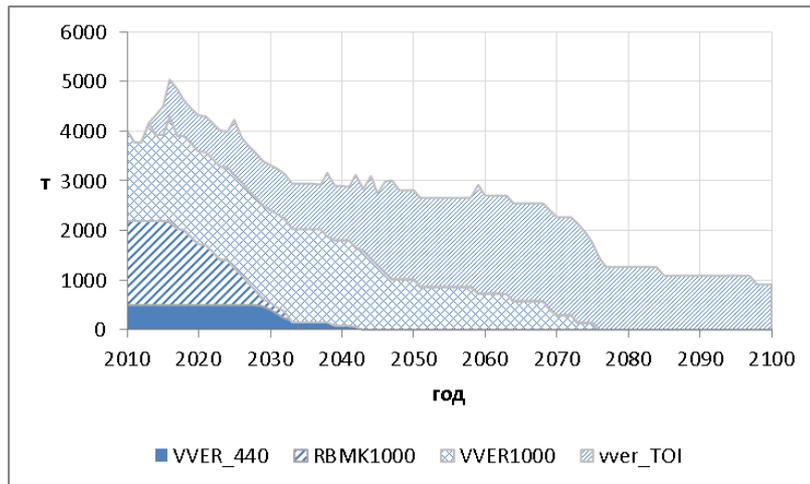
Рис. 20. Структуры установленных мощностей для группы падающих сценариев ЯЭ России



а) референтный сценарий без ввода быстрых реакторов



б) базовый сценарий — своевременное внедрение технологии быстрых натриевых реакторов



в) сценарий с задержкой коммерческого ввода энергоблоков БН-800 на 35 лет

Рис. 21. Потребление природного урана для группы падающих сценариев ЯЭ России

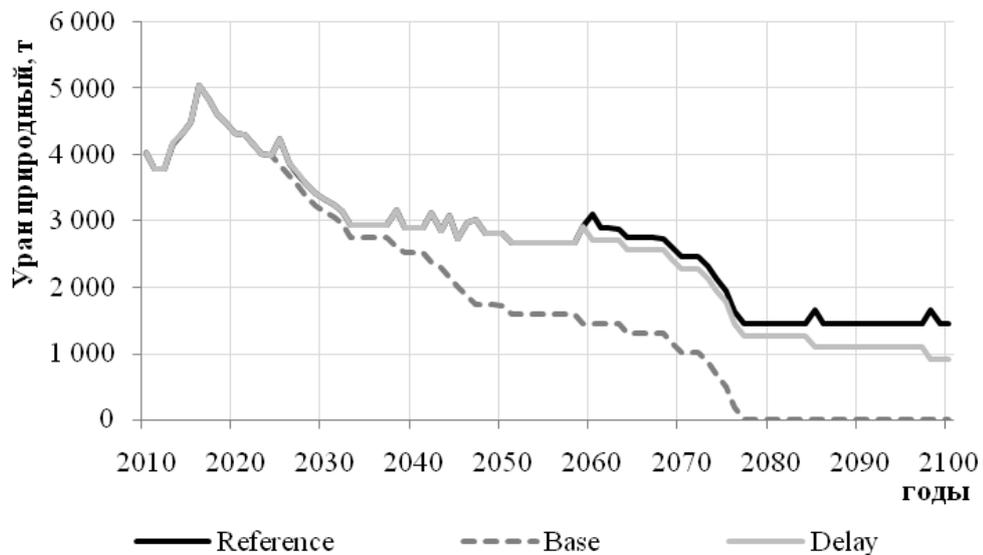


Рис. 22. Сравнение ежегодного потребления природного урана, группа падающих сценариев ЯЭ России

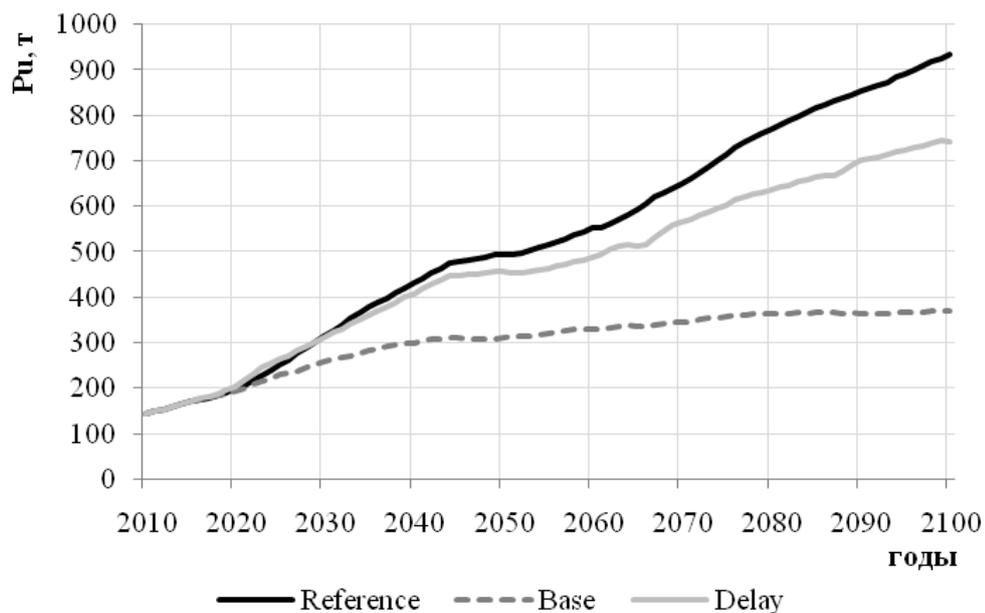
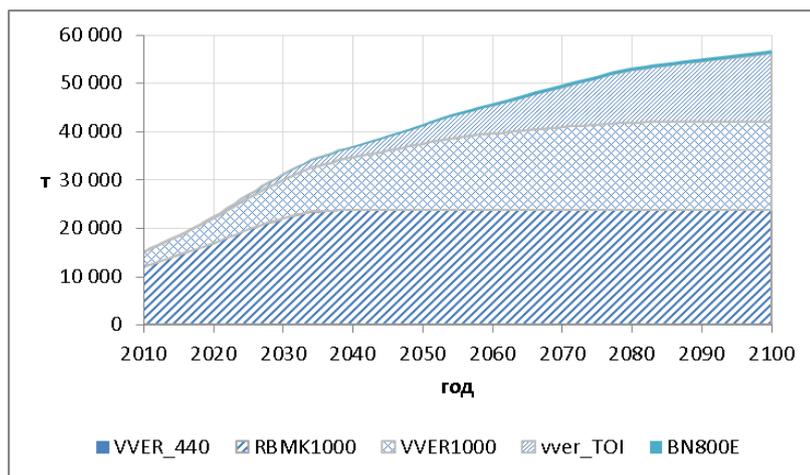
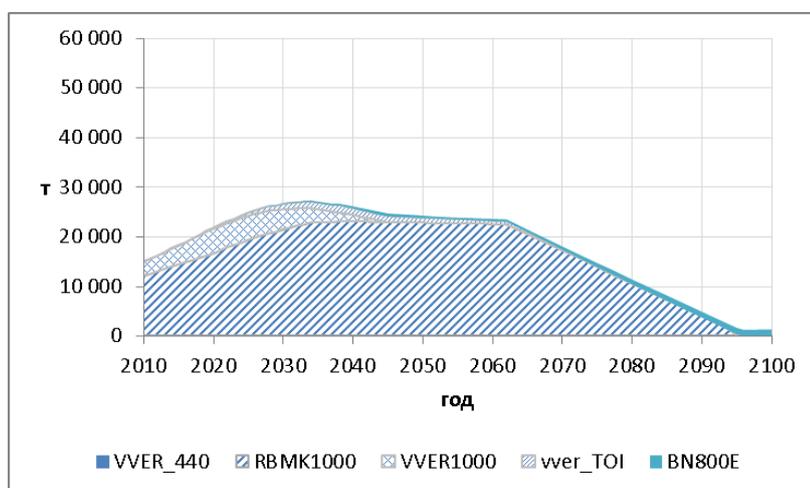


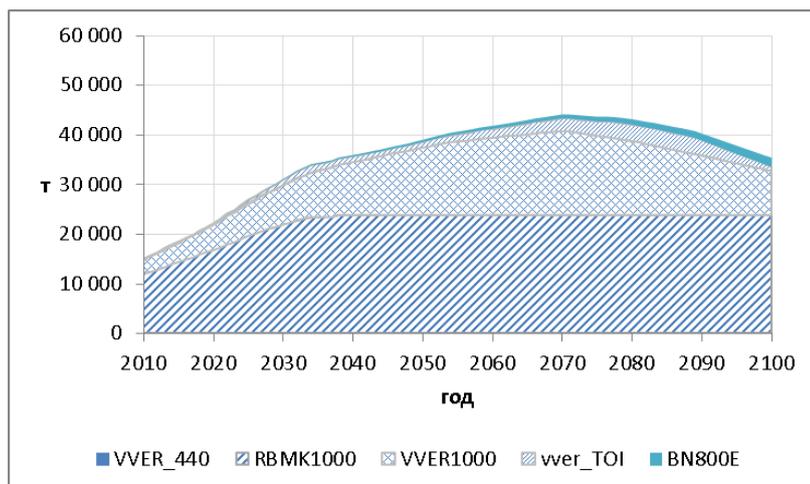
Рис. 23. Накопление плутония в системе, группа падающих сценариев ЯЭ России



а) референтный сценарий без ввода быстрых реакторов



б) базовый сценарий — своевременное внедрение технологии быстрых натриевых реакторов



в) сценарий с задержкой коммерческого ввода энергоблоков БН-800 на 35 лет

Рис. 24. Накопление ОЯТ в системе для группы падающих сценариев ЯЭ России

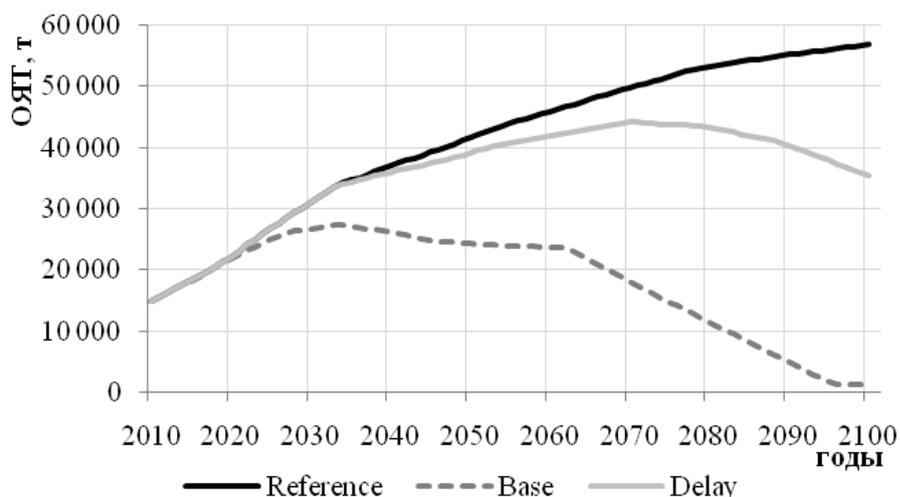


Рис. 25. Сравнение накопления ОЯТ для группы падающих сценариев ЯЭ России

Анализ результатов рисунков 21 и 22 показывает, что интегральное и ежегодное потребление природного урана существенно снижается в двухкомпонентном базовом сценарии по сравнению с референтным и сценарием с отложенным вводом быстрых реакторов.

Сравнение накопления плутония, как показано на рисунке 23, показывает, что рост количества плутония для двухкомпонентных сценариев ниже, чем для референтного, и стабилизируется для двухкомпонентного сценария со своевременным вводом быстрых реакторов на уровне 380 тонн.

Результаты сравнения накопления ОЯТ (рис. 24 и 25) показывают, что в референтном сценарии количество ОЯТ к концу века достигает 57 тыс. т. В двухкомпонентном базовом сценарии количество ОЯТ снижается до 1,5 тыс. т. Сценарий с задержкой ввода показывает лучшие результаты по сравнению с референтным сценарием, но хуже, чем в базовом сценарии.

### **Сравнительный многокритериальный анализ в группе падающих сценариев**

Многокритериальный анализ проводился для трех временных периодов: до 2050, 2070 и 2100 года. В таблице 4 приведены объёмы ОЯТ, количества потреблённого природного урана и накопленного плутония для группы падающих сценариев. Критерии по этим характеристикам строились с использованием приведённой в таблице 4 информации.

При построении критериев для группы падающих сценариев использовались приближения, изложенные в разделе 2.4 для группы растущих сценариев.

Таблица 4. Объёмы ОЯТ, количества потреблённого природного урана и накопленного в системе плутония для группы падающих сценариев

| Сценарий    | $^{nat}U$ , т | Накопленный $Pu$ , т | Объём ОЯТ, т |
|-------------|---------------|----------------------|--------------|
| К 2050 году |               |                      |              |
| RefL        | 145 615       | 495                  | 41 619       |
| BaseL       | 132 819       | 312                  | 24 317       |
| DelayL      | 145 615       | 455                  | 39 069       |
| К 2070 году |               |                      |              |
| RefL        | 202 819       | 661                  | 50 230       |
| BaseL       | 162 368       | 347                  | 17 414       |
| DelayL      | 200 446       | 571                  | 44 154       |
| К 2100 году |               |                      |              |
| RefL        | 248 328       | 934                  | 56 930       |
| BaseL       | 165 609       | 371                  | 1 412        |
| DelayL      | 236 878       | 742                  | 35 465       |

На рисунках 26—28 приведены результаты сравнения рейтингов ЯЭС падающего сценария на разные периоды времени. В результатах содержатся вклады в итоговую оценку от всех рассматриваемых критериев.

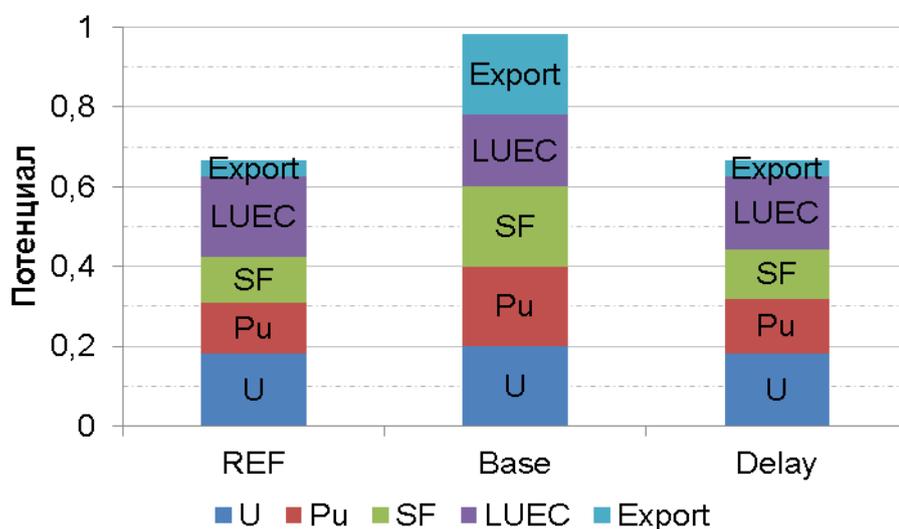


Рис.26. Рейтинги альтернативных ЯЭС на 2050 год, группа падающих сценариев ЯЭ России

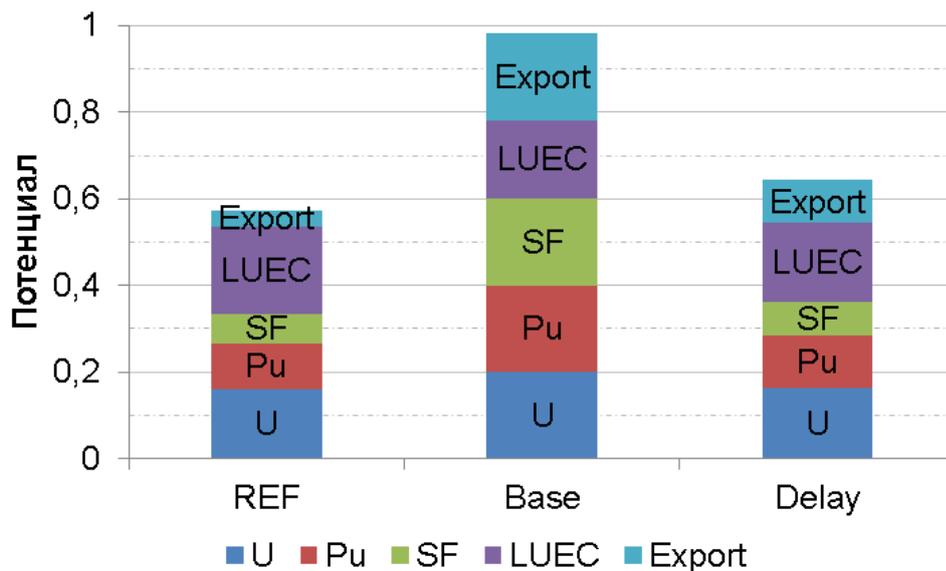


Рис. 27. Рейтинги альтернативных ЯЭС на 2070 год, группа падающих сценариев ЯЭ России

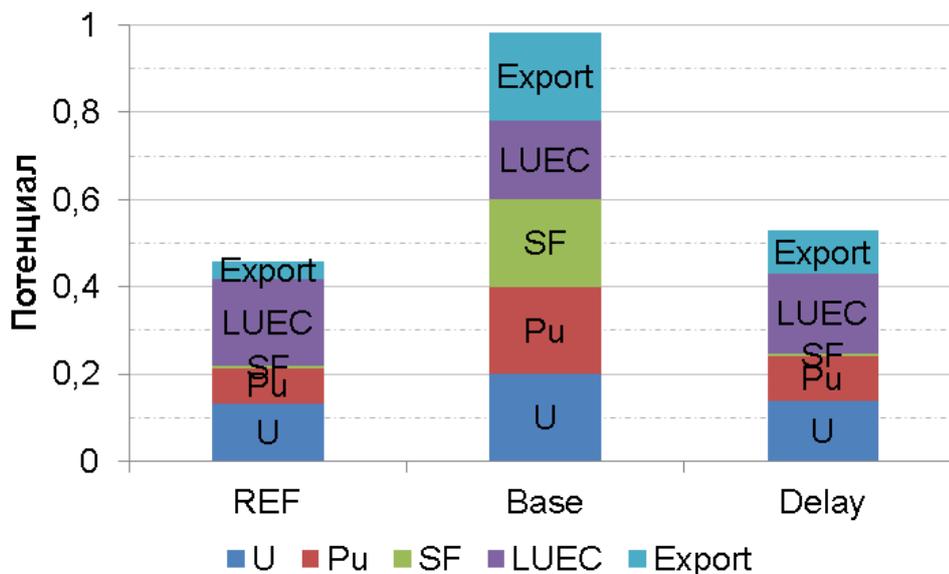


Рисунок 28 – Рейтинги альтернативных ЯЭС на 2100 год, группа падающих сценариев ЯЭ России

Результаты многокритериального анализа для всех вариантов данной группы показали более высокий потенциал для двухкомпонентной системы. ЯЭС с отложенным вводом быстрых реакторов имеет существенно более низкий рейтинг среди двухкомпонентных ЯЭС.

#### **4 Чувствительность результатов МКА двухкомпонентной ЯЭС с тепловыми и быстрыми реакторами к весам и значениям критериев**

В разделе 3 показано существенное преимущество двухкомпонентной системы по сравнению с референтной однокомпонентной. В данном разделе мы будем определять насколько устойчиво данное заключение по отношению к возможному изменению весов и значений критериев. Сначала определим, как влияет изменение весов критериев на рейтинги вариантов сценариев. Напомним, что в разделе 3 результаты многокритериального анализа были получены с учётом одинаковой важности всех пяти критериев. То есть все критерии имели одинаковый вес 20%. Выше уже отмечалось, что экономический критерий для системы ядерных реакторов имеет самую высокую неопределённость. Поэтому в исследованиях была поставлена задача определения влияния изменения веса данного критерия на результаты многокритериального анализа. В исследованиях вес экономического критерия изменялся в сторону увеличения, а веса остальных критериев «подстраивались» к этому изменению таким образом, чтобы сумма всех весов оставалась равной единице.

##### **4.1 Исследования чувствительности к весам критериев. Группа растущих сценариев**

В данной группе рассматривалось влияние изменения веса экономического критерия (LCOE) в пределах 20—80 % на соотношение рейтингов ЯЭС. Результаты представлены на рисунке 29.

На рисунке 30 приведены графики зависимости рейтингов сценариев на 2100 год в группе растущих сценариев от изменения веса экономического критерия.

Результаты показывают преимущество двухкомпонентного сценария со своевременным вводом быстрых реакторов перед референтным и сценарием с задержкой ввода быстрых реакторов до достижения веса экономического критерия примерно 60 %. Заметим, что при этом суммарный вес остальных четырёх критериев становится равным 40 %. Сценарий с задержкой ввода имеет преимущество перед референтным только при достаточно низких весах экономического критерия. Таким образом, преимущество двухкомпонентного сценария достаточно устойчиво в группе растущих сценариев. Альтернативы становятся равновесными при весе экономики примерно 60 %.

## Рейтинг ЯЭС

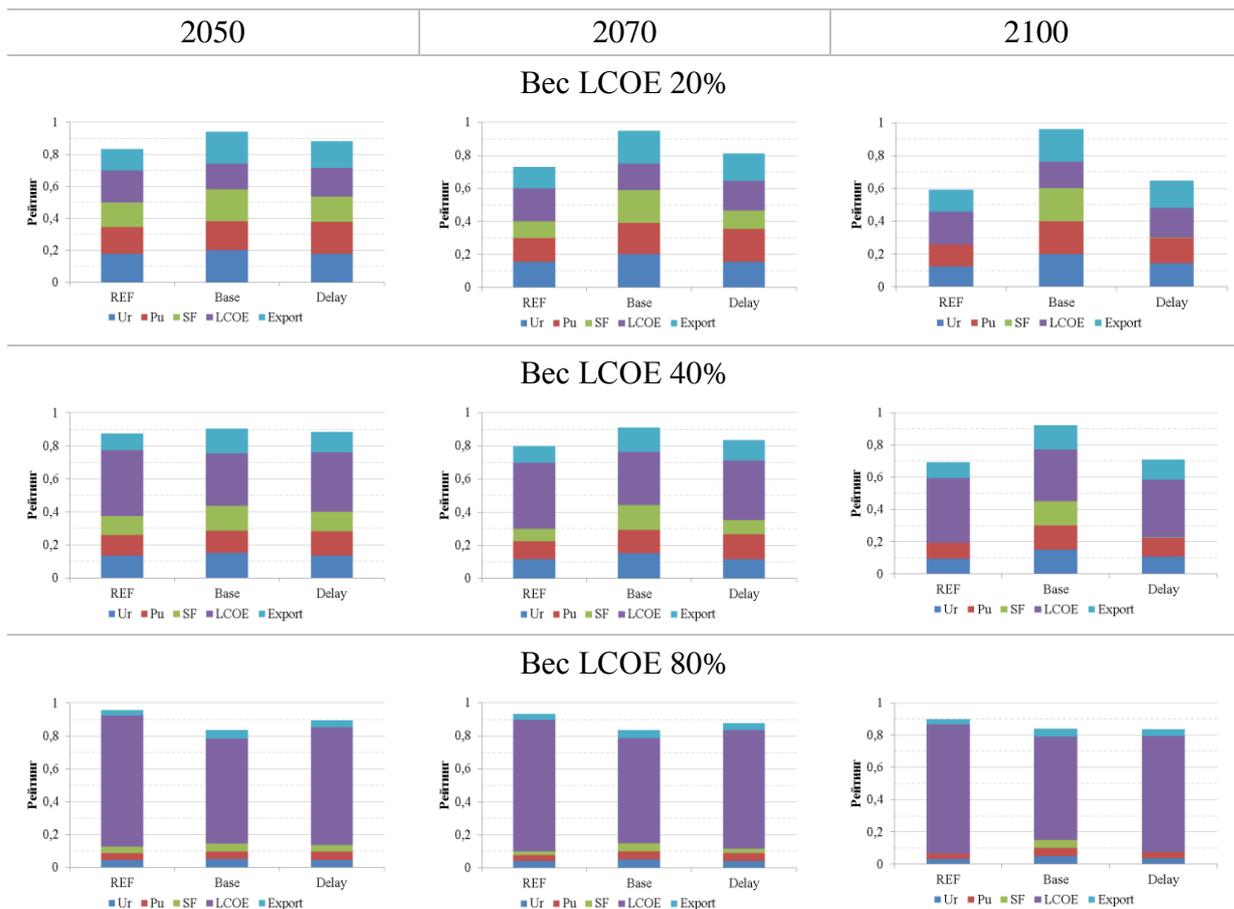


Рис. 29. Растущие сценарии. Чувствительности к весам

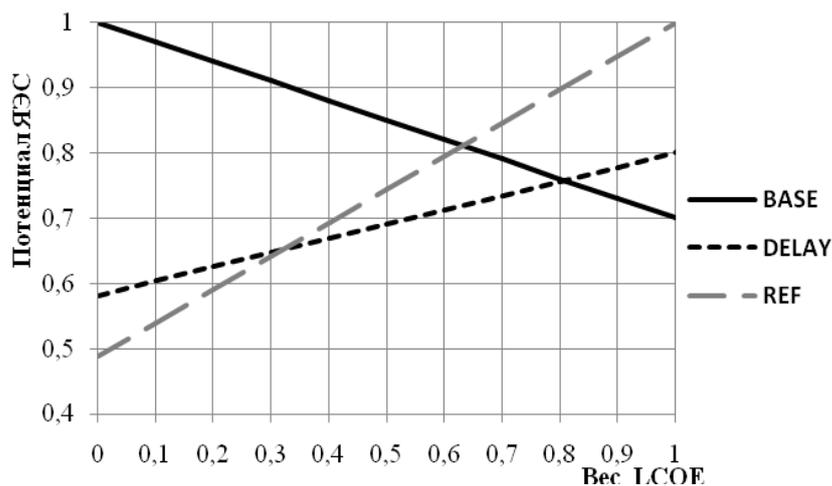


Рис. 30. Зависимость рейтингов сценариев от значения веса экономического критерия для группы растущих сценариев

## 4.2 Исследования чувствительности к весам критериев.

### Группа стационарных сценариев

В данной группе рассматривалось изменение веса экономического критерия в пределах 20—80 %. Результаты представлены на рисунке 31.

На рисунке 32 приведены графики зависимости рейтингов на 2100 год в группе стационарных сценариев от изменения веса экономического критерия. То есть анализировалась чувствительность сценариев к весу экономического критерия.

Результаты показывают преимущество двухкомпонентного сценария со своевременным вводом быстрых реакторов перед референтным сценарием до достижения веса экономического критерия примерно 70%. Заметим, что при этом суммарный вес остальных четырёх критериев становится равным 30%. Сценарий с задержкой ввода имеет преимущество перед референтным только при достаточно низких весах экономического критерия.

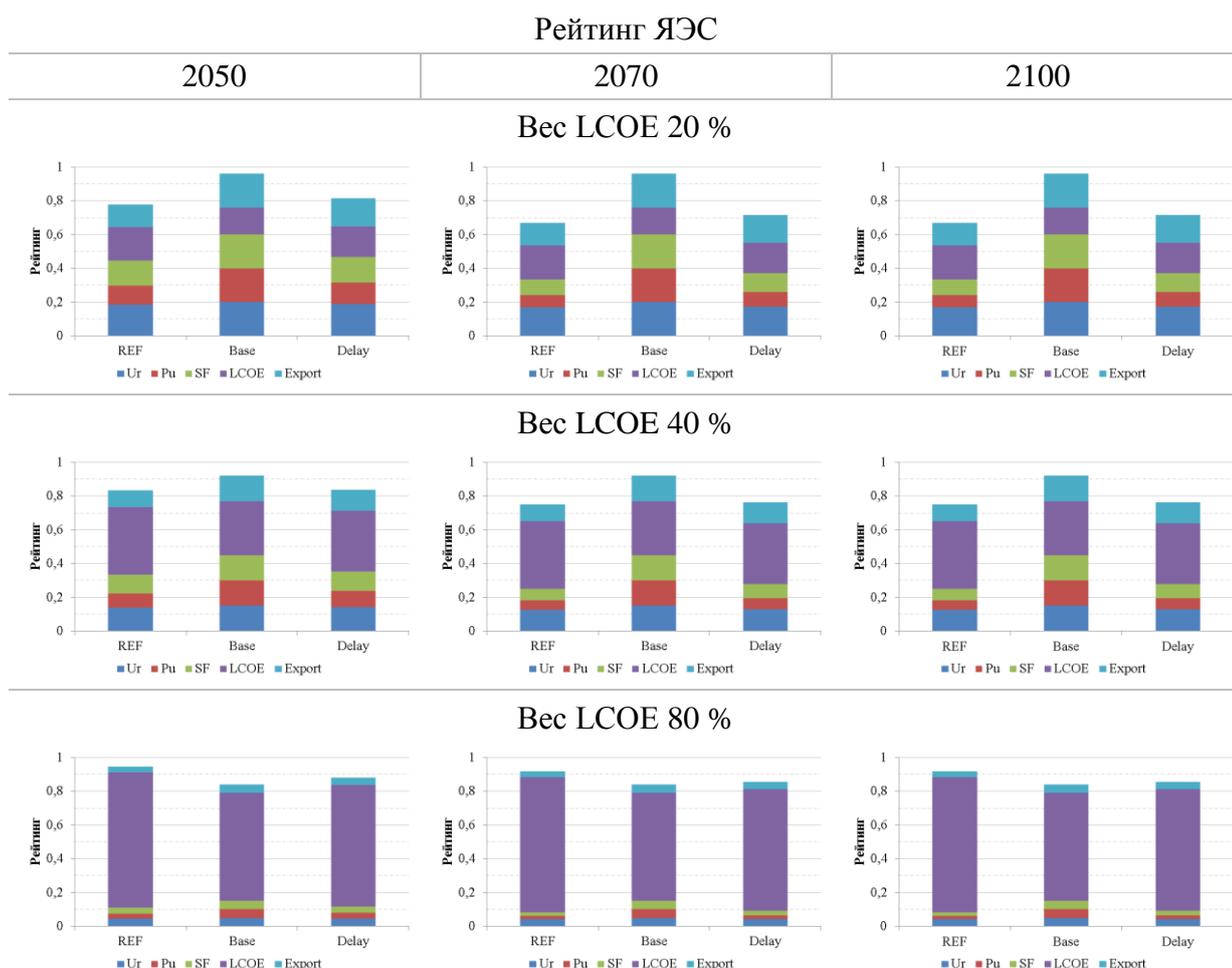


Рис. 31. Влияние изменения веса экономики на рейтинг вариантов в группе стационарных сценариев

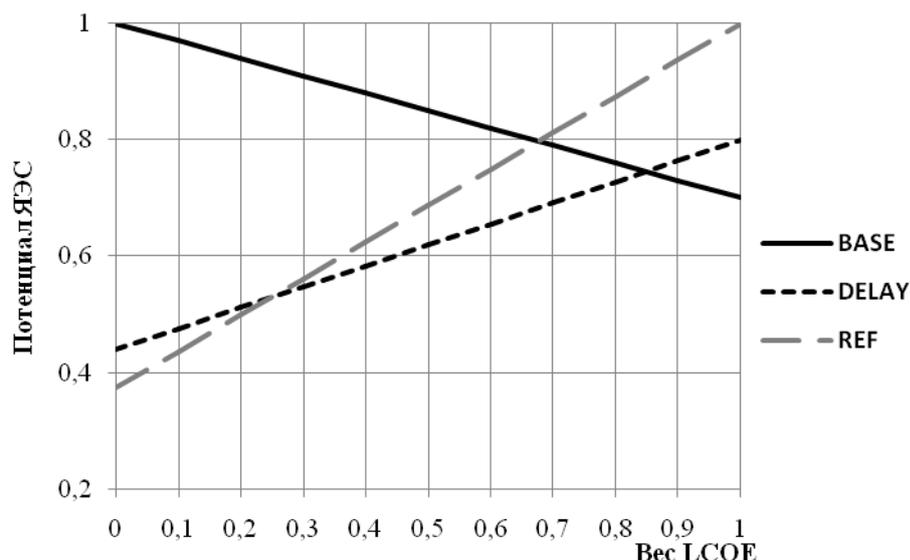


Рис. 32. Зависимость рейтингов сценариев от значения веса экономического критерия для группы стационарных сценариев

Таким образом, преимущество двухкомпонентного сценария достаточно устойчиво и в группе стационарных сценариев. Альтернативы становятся равнозначными при весе экономики 70% по сравнению с критерием ОЯТ, уран, плутоний и экспорт вместе взятыми.

### 4.3 Исследования чувствительности к весам критериев. Группа падающих сценариев

В данной группе рассматривалось влияние изменения веса экономического критерия в пределах 20—80 % на соотношение рейтингов ЯЭС в сценариях. Результаты представлены на рисунке 33.

На рис. 34 приведены зависимости рейтингов на 2100 г. в группе падающих сценариев от изменения веса экономического критерия. То есть анализировалась чувствительность сценариев к весу экономического критерия.

Результаты показывают преимущество двухкомпонентного сценария со своевременным вводом быстрых реакторов перед референтным до достижения веса экономического критерия примерно 0,65. Заметим, что при этом суммарный вес остальных четырёх критериев становится равным 0,35. Сценарий с задержкой ввода имеет преимущество перед референтным только при достаточно низких весах экономического критерия. Таким образом, преимущество двухкомпонентного сценария достаточно устойчиво и в группе падающих сценариев. Альтернативы становятся равнозначными при весе экономики 65% по сравнению с вместе взятыми критериями ОЯТ, уран, плутоний и экспорт.

### Рейтинг ЯЭС

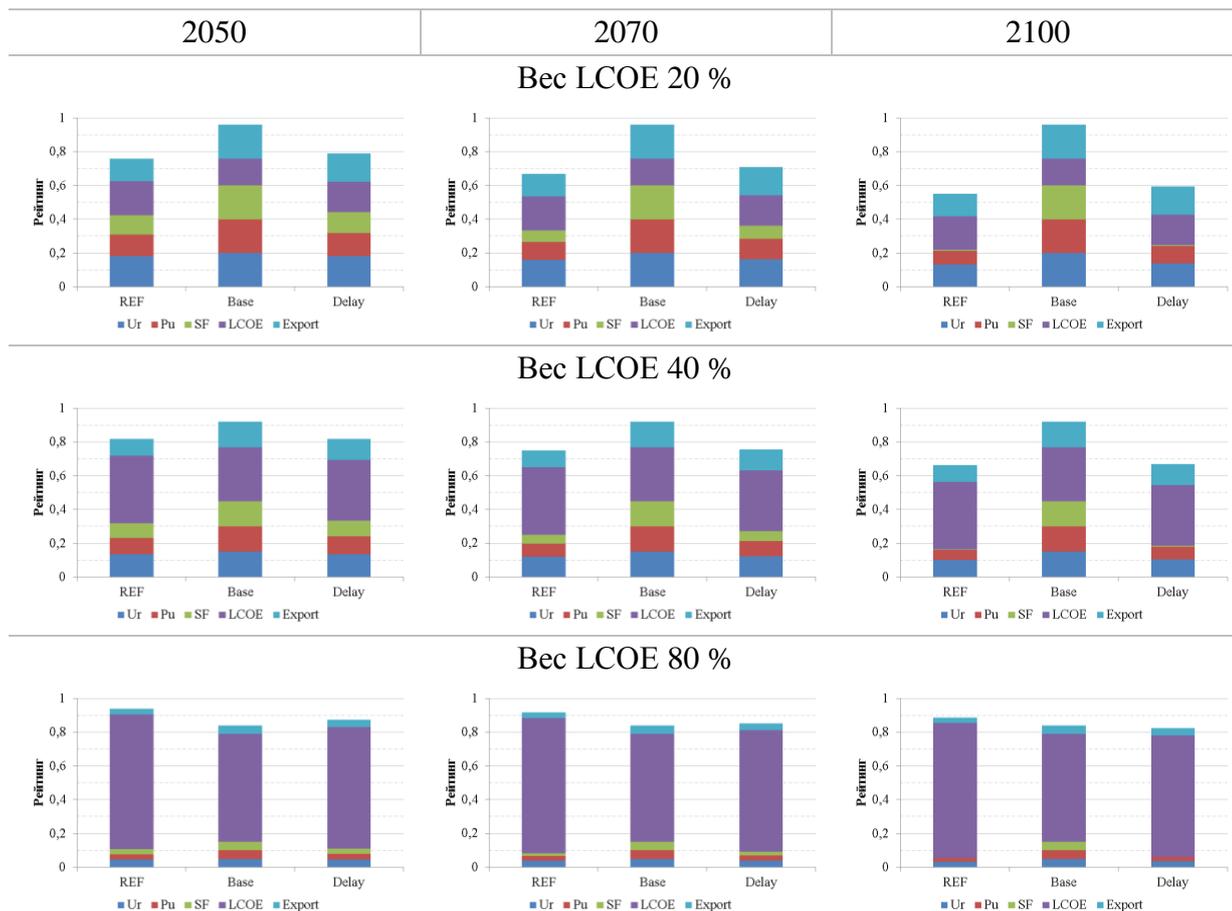


Рис. 33. Влияние изменения веса экономики на рейтинг ЯЭС в группе падающих сценариев

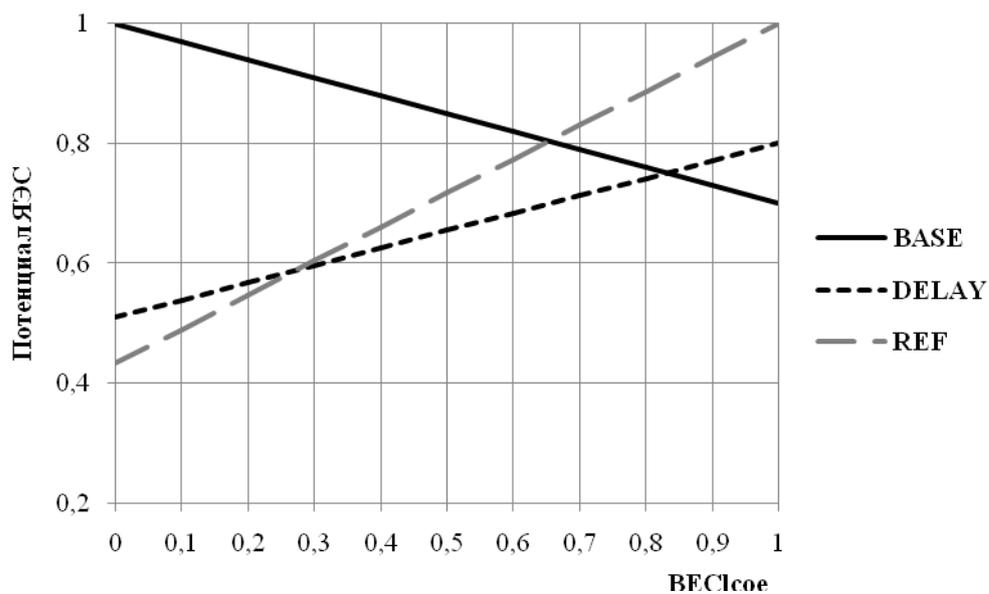


Рис. 34. Зависимость рейтингов сценариев от значения веса экономического критерия для группы падающих сценариев

#### **4.4 Исследования чувствительности к изменению значений критериев**

Сложности определения чувствительностей к выбранным весам и критериям при проведении МКА сценариев развития АЭ заключаются прежде всего в отсутствии полноценной информации по неопределённостям в значениях используемых критериев, не говоря уже о статистике, которая широко используется, например, в ядерных данных. Таким образом, приемы, используемые в анализе расчётов ядерных реакторов, в нашей задаче использовать достаточно сложно. Для учёта неопределённостей в исследованиях применения МКА в обоснование стратегии развития АЭ мы использовали «директивный» подход. В рамках данного подхода предлагается проводить изменение значений весов и критериев в «ручном» режиме с использованием групп экспертов. Для облегчения данной работы разработано специальное программное обеспечение, которое достаточно быстро позволяет пользователю определить, как повлияет изменение веса или критерия на значение результата МКА. В предыдущем разделе была исследована чувствительность к весам. В данном разделе рассмотрим чувствительности к изменению критериев. Выше отмечалось, что наибольшей неопределённостью обладают критерии, связанные с экономикой. Ниже показано, как меняются рейтинги вариантов при изменении значений экономического критерия.

## Группа растущих сценариев

В данной группе рассматривалось изменение экономического критерия от исходного значения 0,8 при весе экономического критерия равного 80 %. Результаты представлены на рисунке 35.



Рис. 35. Влияние изменения критерия экономики на рейтинг ЯЭС в группе растущих сценариев

## Группа стационарных сценариев

В данной группе рассматривалось изменение экономического критерия от исходного значения при весе экономического критерия равного 80%. Результаты представлены на рисунке 36.

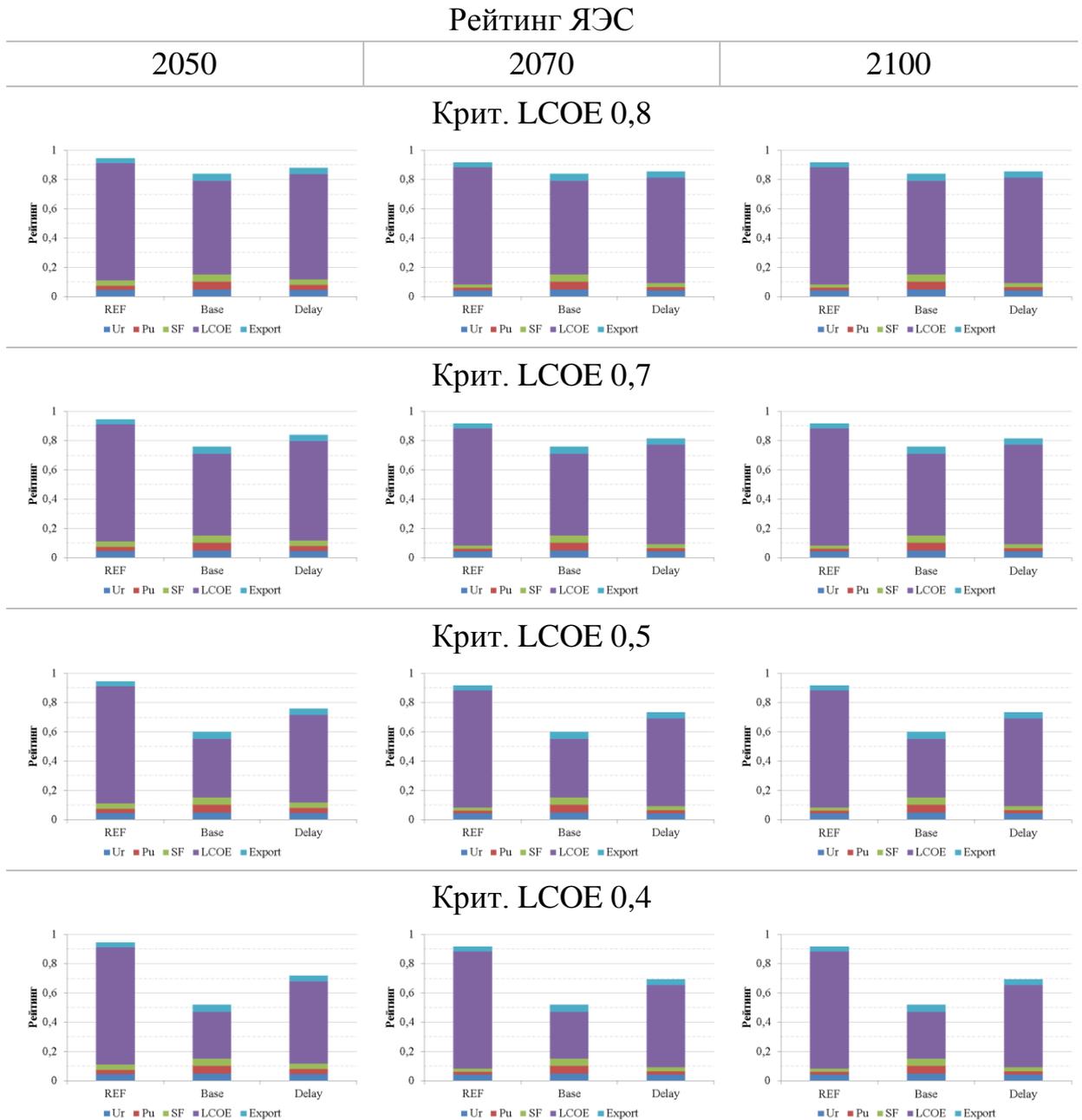


Рис. 36. Влияние изменения критерия экономики на рейтинг ЯЭС  
в группе стационарных сценариев

## Группа сценариев снижения установленной мощности

В данной группе рассматривалось изменение экономического критерия от исходного значения при весе экономического критерия равного 80%. Результаты представлены на рисунке 37.

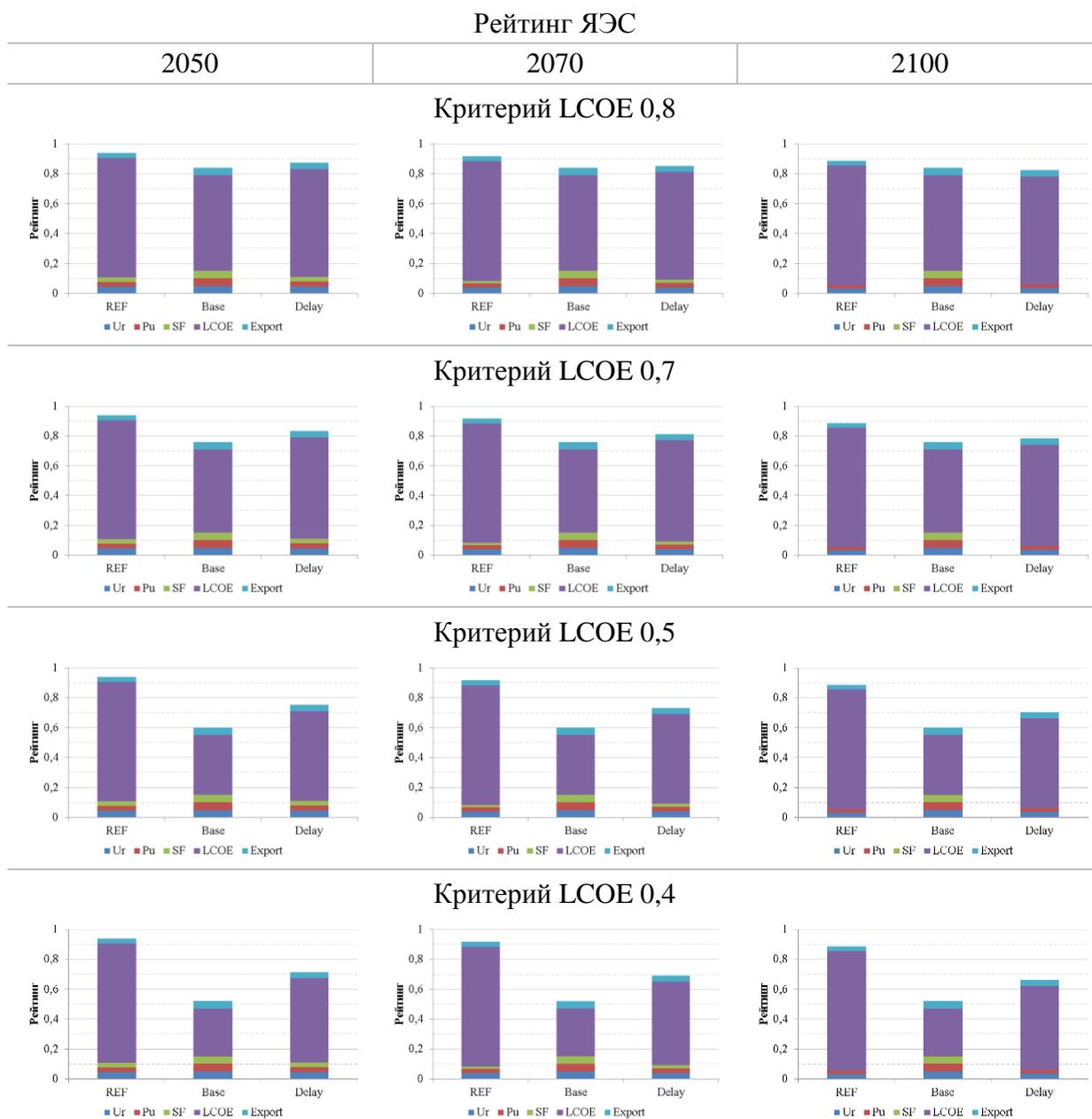
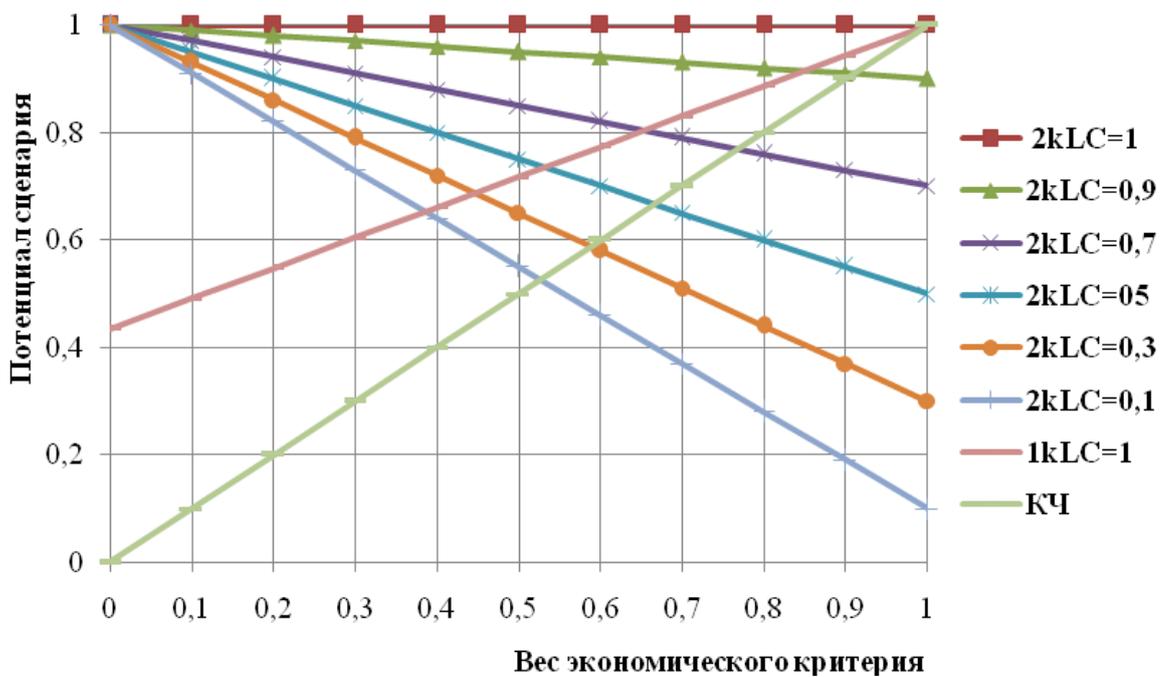


Рис. 37. Влияние изменения критерия экономики на рейтинг ЯЭС в группе падающих сценариев

На рисунке 38 приведена графическая зависимость рейтингов сценариев в группе растущих сценариев на 2100 год в зависимости от значения экономического критерия и его веса для двухкомпонентных сценариев со своевременным вводом быстрых реакторов. На этом же графике приведена зависимость рейтингов от веса для референтного сценария и зависимость коэффициента чувствительности к экономическому критерию от веса.



Обозначения:

$2kLC=0,9$  — зависимость рейтинга двухкомпонентной системы при значении экономического критерия  $LCOE=0,9$ ;  
аналогично для других значений экономического критерия;

$1kLC=1$  — зависимость рейтинга референтной системы при значении экономического критерия  $LCOE=1$ ;

$КЧ$  — зависимость коэффициента чувствительности от веса экономического критерия.

Рис. 38. Чувствительность рейтингов к изменению критерия  $LCOE$  в зависимости от веса

Из результатов, приведённых на рисунке 38, следует, что при увеличении веса экономического критерия чувствительность к изменению экономического критерия возрастает.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Ввиду большого количества фактов, как объективных, так и субъективных, невозможно сколько-нибудь определённо и уверенно прогнозировать направление будущего развития ЯЭ России на длительный период времени, но можно рассмотреть траектории развития.

В данной работе для учёта разнообразных тенденций развития ядерной энергетики были выделены три группы сценариев развития ЯЭ России. Первая группа — это растущие сценарии, в которых количество блоков, и их суммарная установленная мощность со временем растут. Вторая группа сценариев предполагает, что после некоторого времени роста установленных мощностей произойдёт выход на стационарный уровень, в котором изменения мощности от времени не будет. Третий тип сценариев моделирует снижение установленных мощностей ядерной энергетики в стране после некоторого их роста. Внутри каждой группы предполагалось три типа сценариев с одинаковым изменением мощностей. Первый — референтный, только с реакторами на тепловых нейтронах. Другие два — двухкомпонентные: со «своевременным» вводом реакторов на быстрых нейтронах (базовый сценарий) и отложенным вводом быстрых реакторов.

Результаты многокритериального анализа для всех вариантов групп сценариев показали наибольший потенциал для двухкомпонентной системы. Вариант с отложенным вводом быстрых реакторов имеет более низкий рейтинг среди двухкомпонентных ЯЭС, но более высокий по сравнению с референтной однокомпонентной системой. То есть включение в систему ядерной энергетики быстрых реакторов для всех рассмотренных вариантов развития позволит решить ее системные проблемы, в том числе наиболее важные.

Важным этапом данной работы являлся детальный анализ неопределённостей исходных данных, используемых для получения критериев и их весов.

На первом этапе рассматривалось влияние изменения весов критериев на рейтинги сценариев. Выше уже отмечалось, что экономический критерий для системы ядерных реакторов имеет самую высокую неопределённость. Поэтому в исследованиях была поставлена задача оценки влияния не только изменения веса данного критерия на результаты многокритериального анализа, но и значения критерия.

Результаты исследований показали устойчивость рейтингов двухкомпонентных систем для разных групп сценариев для достаточно существенных изменений (ухудшений) значений экономического критерия и его веса.

Результаты двухкомпонентного сценария со своевременным вводом реакторов на быстрых нейтронах показали наивысший рейтинг по сравнению с референтным сценарием и сценарием с отложенным вводом реакторов на быстрых нейтронах для всех групп сценариев. Это означает, что наилучшим путём решения накопленных проблем ядерной энергетики: сокращения объёмов ОЯТ, экономии природного урана, улучшения экспортного потенциала, сокращения объёмов накопления плутония — является переход к двухкомпонентной системе с быстрыми и тепловыми реакторами. При этом своевременный ввод быстрых реакторов показывает наилучшие результаты во всех группах сценариев.

### Список литературы

1. *Алексеев П.Н., Алексеев С.В., Андрианова Е.А. и др.* Двухкомпонентная ядерная энергетическая система с тепловыми и быстрыми реакторами в замкнутом ядерном топливном цикле / Под ред. акад. РАН Пономарева-Степного Н.Н. — Москва: Техносфера, 2016.
2. *Егоров А.Ф., Коробейников В.В.* Оценка чувствительности сценариев развития ядерной энергетики России к возможным изменениям выбранных экономических параметров: Препринт ФЭИ-3269 — Обнинск: ГНЦ РФ-ФЭИ, 2016. 17 с.
3. *Егоров А.Ф., Коробейников В.В.* Применение многокритериального анализа для сравнения инновационных ядерно-энергетических систем // ВАНТ. Серия: Ядерно-реакторные константы. — 2017. — Вып. 2. — С. 5—13.
4. *Алексеев П.Н., Баланин А.Л., Декусар В.М., Егоров А.Ф., Клинов Д.А., Коробейников В.В., Марова Е.В., Маслов А.М., Невиница В.А., Староверов А.И., Фомиченко П.А., Шепелев С.Ф., Широков А.В.* Развитие физико-технических решений по проекту БН-1200 в контексте повышения конкурентоспособности технологии БН // ВАНТ. Серия: Ядерно-реакторные константы. — 2018. — Вып. 2.
5. *Алексеев П.Н., Бландинский В.Ю., Баланин А.Л., Гроль А.В., Гулевич А.В., Декусар В.М., Егоров А.Ф., Коробейников В.В., Марова Е.В., Маслов А.М., Мосеев А.Л., Невиница В.А., Теплов П.С., Фаракишин М.Р.* Многофакторная оценка конкурентоспособности коммерческого энергоблока типа БН в системе энергетики России // ВАНТ. Серия: Ядерно-реакторные константы. — 2019. — Вып. 3 — С. 45—61.
6. *Егоров А.Ф., Клинов Д.А., Коробейников В.В., Мосеев А.Л., Марова Е.В., Шепелев С.Ф.* Результаты многокритериального анализа сценариев развития ядерной энергетики с учётом структуры энергетики России // ВАНТ. Серия: Ядерно-реакторные константы. — 2017. — Вып. 4. — С. 4—7.
7. *Калашиников А.Г., Мосеев А.Л., Декусар В.М., Коробейников В.В., Мосеев П.А.* Развитие программного комплекса CYCLE для системного анализа ядерного топливного цикла // Известия вузов. Ядерная энергетика. — 2016. — №1. — С. 91—99.

8. *Асмолов В.Г.* Требования к атомной энергетике с учетом мировых тенденций и вызовов / Материалы конференции «Нейтроника–2017». — 29 ноября – 01 декабря 2017. — Обнинск. — 2017.

9. *Мосеев А.Л., Декусар В.М., Коробейников В.В., Елисеев В.А.* Исследования потенциала двухкомпонентной системы ЯЭ в разных условиях её развития. // ВАНТ. Серия: Ядерно-реакторные константы. — 2019. — Вып. 2. — С. 189—205. — URL: <https://vant.ippe.ru/year2019/2/neutron-constants/1717-19.html>

10. *Егоров А.Ф., Коробейников В.В.* Сравнение инновационных ядерно-энергетических систем на основе выбранных ключевых индикаторов и их весовых коэффициентов. // Конференция МАГАТЭ по быстрым реакторам и соответствующим топливным циклам (FR17). id434. — URL: <https://conferences.iaea.org/indico/event/126/abstract-book.pdf>

11. *Декусар В.М., Егоров А.Ф., Коробейников В.В., Мосеев А.Л., Мосеев П.А.* Оценка эффективности сценариев развития ядерной энергетики России с учётом неядерной энергетики // V Международная научно-техническая конференция «Инновационные проекты и технологии ядерной энергетики» (МНТК НИКИЭТ-2018). — АО «НИКИЭТ имени Н.А. Доллежала», г. Москва, 2–5 октября 2018 г. — М. : АО «НИКИЭТ». С. 141—142. ISBN 978-5-98706-120-6.

Подписано к печати 25.03.20. Формат 60×84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Усл. п. л. 1,6. Уч.-изд. л. 2,2.  
Тираж 50 экз. Заказ № 85.

Отпечатано в ОНТИ методом прямого репродуцирования с оригинала авторов.  
249033, Обнинск Калужской обл., пл. Бондаренко, 1.  
ГНЦ РФ – Физико-энергетический институт имени А.И. Лейпунского