

РАСЧЕТНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СЦЕНАРИЕВ РАЗВИТИЯ ГЛОБАЛЬНОЙ АЭ В ПРЕДПОЛОЖЕНИИ НЕОДНОРОДНОГО РАЗВИТИЯ МИРА

А.Ф. Егоров, В.В. Коробейников, Е.В. Поплавская, Г.А. Фесенко
ГНЦ РФ-ФЭИ им. А.И.Лейпунского, г. Обнинск



Исследуется модель развития мировой атомной энергетики до 2100 г. Для сравнительного анализа сценариев перехода к устойчивым ядерно-энергетическим системам используются модели неоднородного развития мира с учетом специфики развития стран. Выбранные модели максимально, по мнению международных экспертов, приближены к реальной будущей картине мира. Модельные сценарии глобального развития АЭ до 2100 г. являются взаимозависимыми, и сформулированы так, чтобы суммарная мощность АЭ по всем сценариям оставалась постоянной и равной 5000 ГВт к 2100 г. для высокого варианта развития и 2500 ГВт – для умеренного.

Ключевые слова: моделирование топливного цикла, легководные реакторы, тяжеловодные реакторы, реакторы на быстрых нейтронах, синергия, природный уран, оптимизация, мировая ядерная энергетика, топливные балансы.

Key words: nuclear fuel cycle modeling, light water reactors, heavy water reactors, fast breeder reactors, synergy, natural uranium, optimization, Global Nuclear Energy, fuel balance.

ВВЕДЕНИЕ

Руководящий комитет ИНПРО (Международный проект по инновационным ядерным реакторам и топливным циклам) МАГАТЭ [1] в 2011 г. принял план действий на период 2011–2017 гг. В нем перечислены основные направления деятельности ИНПРО, центральным из которых является «Глобальное видение и сценарии развития атомной энергетики в XXI веке». Основным итогом работы по проекту проекта ИНПРО в 2012 г. стало создание уникальной международной программно-аналитической платформы и базы данных для сравнительного анализа сценариев перехода к устойчивым ядерно-энергетическим системам, включающим в себя модели неоднородного развития мира с учетом специфики развития стран, максимально, по мнению экспертов, приближенные к реальной будущей картине мира. Такие модели позволят выявить области взаимовыгодного сотрудничества между странами и определить многосторонние подходы к решению проблем АЭ. Авторы данной работы участвовали в международных исследованиях в рамках ИНПРО. В статье приводится часть наиболее интересных результатов расчетов сценариев развития атомной энергетики мира с использованием программного комплекса MESSAGE [2].

© А.Ф. Егоров, В.В. Коробейников, Е.В. Поплавская, Г.А. Фесенко, 2013

ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ ГЕТЕРОГЕННОГО РАЗВИТИЯ МИРОВОЙ АЭ, ВЫБОР СЦЕНАРИЕВ РАЗВИТИЯ ГЛОБАЛЬНОЙ АЭ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Анализируются два варианта развития мировой атомной энергетики:

- умеренный рост мощностей (2500 ГВт эл. к 2100 г. – вариант 1);
- высокий рост мощностей (5000 ГВт эл. к 2100 г. – вариант 2).

Согласно отчету GAINS (подпроект ИНПРО) [1], глобальная структура АЭ может быть представлена в виде трех групп стран – NG1, NG2 и NG3.

В проекте разработан новый подход по объединению стран в группы по негеографическому принципу, т.е. группы объединяют страны, обладающие похожими стратегиями в области ЯТЦ, в особенности, подходами к обращению с ОЯТ, а также похожими национальными задачами в области развития АЭ. Таким образом, первая группа (NG1) включает в себя страны с развитыми технологиями топливного цикла. Они намерены развивать и внедрять инновационную ЯЭС и, по возможности, скорее довести ее до коммерческого уровня. К ним относятся страны, которые в своих стратегиях развития АЭ рассматривают переработку ОЯТ и переход к АЭ на основе замкнутого топливного цикла и быстрых реакторов.

Ко второй группе (NG2) относятся страны, имеющие значительный опыт в использовании АЭ и освоенные технологии начального этапа ЯТЦ (конверсия, обогащение, производство свежего топлива), но не планирующие внедрения инновационной ЯЭС в скором времени. В области обращения с облученным топливом они рассматривают открытый топливный цикл, т.е. хранение и захоронение ОЯТ.

К третьей группе (NG3) относятся страны-«новички», которые рассматривают атомную энергетику для диверсификации источников энергоснабжения. Они имеют только реакторы и пока не определились с дальнейшей стратегией топливного цикла могут выбрать либо открытый ЯТЦ, либо переработку ОЯТ в группе стран NG1.

В исследованиях модель неоднородного развития мира рассматривается двояко. В первом случае группы стран развиваются по отдельности, а во втором случае предполагается взаимодействие групп стран для решения общих задач по захоронению и переработке ОЯТ.

Математическая модель включает в себя три типа реакторов: быстрые – БР, FR, водо-водяные – ВВЭР, LWR и тяжеловодные – HWR. При этом в первой группе стран (NG1) работают реакторы LWR и FR, в группе NG2 – реакторы LWR и HWR, в группе NG3 – только реакторы LWR.

Согласно модельным представлениям развития атомной энергетики на 2008–2100 гг. и на перспективу до 2130 г., предполагается сохранение доли тяжеловодных реакторов HWR на уровне 6% от суммарных мощностей всех групп стран NG1, NG2, NG3.

В модель также заложен ввод быстрых реакторов по следующей схеме:

- с 2021 по 2030 гг. ежегодный рост мощностей по 1 ГВт (э) (10 ГВт к 2030 г.);
- с 2031 по 2050 гг. по 9.5 ГВт (э) ежегодно (200 ГВт к 2050 г.) для варианта 1 и по 19.5 ГВт (э) ежегодно (400 ГВт к 2050 г.) для варианта 2;
- с 2051 г. БР вводятся исходя из наличия плутония с максимально возможной долей быстрых реакторов.

Технические характеристики технологий ЯТЦ, использованные в модели, рассмотрены в работе [3].

Более детальный перечень модельных предположений программы MESSAGE (расчетные возможности модели, сведения о технических характеристиках тепловых и быстрых реакторов, истории ввода блоков LWR, HWR, инфраструктура, ресурсные

ограничения, концептуальная схема ЯТЦ, стоимостные характеристики рассматриваемых технологий) представлен в работе [1].

Согласно схеме и заложенному модельному предположению, 50% ОЯТ из реакторов стран NG3 будут поступать на переработку в страны NG1, а оставшиеся 50% поступят в хранилища стран NG2.

ВАРИАЦИИ СЦЕНАРИЕВ РАЗВИТИЯ ГЛОБАЛЬНОЙ АЭ ПО ПРОЕКТУ SYNERGIES

Моделирование сценариев развития глобальной атомной энергетики с умеренным (вариант 1) и высоким (вариант 2) ростом мощности включает в себя моделирование в каждом варианте базового сценария развития и четырех дополнительных. Сценарии различаются между собой соотношениями в распределении мощности АЭ между группами стран NG1, NG2 и NG3. Кроме того, все сценарные варианты предполагают как независимое развитие атомной энергетики в выделенных группах, так и их синергическое (межгрупповое) взаимодействие для достижения обоюдных выгод от сотрудничества. В итоге получается более 30-ти анализируемых вариантов расчета.

В таблицах 1 – 5 показаны исходные данные и результаты работы сценариев математической модели только по высокому (вариант 2) росту мощностей АЭ к 2100 г. в трех группах стран. Расширенная информация о сценариях вариантов 1 и 2 приводится в работе [4].

Таблица 1

Вариант 2. Сценарий 1 Минимальное количество ОЯТ. Низкая доля группы стран NG2 (снижение мощности в NG2 с 25 % в 2008 г. до 10 % к 2100 г.)

Год	NG1	NG2	NG3	Всего, ГВт
2008	224	75	0	298
2030	517	150	33	700
2050	1091	272	137	1500
2100	3500	500	1000	5000

Таблица 2

Вариант 2. Сценарий 2 Высокая доля группы стран NG1 (увеличение мощности в NG1 с 50 % в 2008 г. до 65 % к 2100 г.)

Год	NG1	NG2	NG3	Всего, ГВт
2008	149	149	0	298
2030	358	308	33	700
2050	853	510	137	1500
2100	3250	750	1000	5000

Таблица 3

Вариант 2. Сценарий 3 (базовый) (разбивка мощности по группам стран: 40, 40, 20% в 2100 г.)

Год	NG1	NG2	NG3	Всего, ГВт
2008	149	149	0	298
2030	333	333	33	700
2050	682	682	137	1500
2100	2000	2000	1000	5000

Таблица 4

**Вариант 2. Сценарий 4. Высокая доля группы стран NG2
(увеличение мощности в NG2 с 50 % в 2008 г. до 65 % к 2100 г.)**

Год	NG1	NG2	NG3	Всего, ГВт
2008	149	149	0	298
2030	308	358	33	700
2050	510	853	137	1500
2100	750	3250	1000	5000

Таблица 5

**Вариант 2. Сценарий 5.
Минимальная переработка ОЯТ. Низкая доля группы стран NG1
(снижение мощности в NG1 с 35 % в 2008 г. до 10 % к 2100 г.)**

Год	NG1	NG2	NG3	Всего, ГВт
2008	104	194	0	298
2030	203	463	33	700
2050	354	1009	137	1500
2100	500	3500	1000	5000

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ СЦЕНАРИЕВ

В ходе работы было проведено сравнение результатов моделирования математической модели развития мировой атомной энергетики при независимом и синергическом развитии ее в каждой из трех групп стран. В соответствии с табл. 1–5 рассмотрено пять сценариев.

Получено 15 сценарных вариантов развития АЭ с ключевыми показателями по каждому сценарию и по каждой группе стран:

- структура генерирующих мощностей АЭ;
- суммарное потребление природного урана;
- разделительные работы;
- производство топлива;
- переработка топлива;
- накопление и потребление плутония;
- отработавшее топливо в хранилищах (с учетом охлаждаемого топлива).

Данные таблиц позволяют сделать вывод о том, что в системе мировой атомной энергетики у групп стран NG1 и NG2 есть коридоры роста мощностей АЭ при реализации сценариев с минимальным количеством ОЯТ (сценарий 1) и с минимальным количеством мощностей по переработке ОЯТ (сценарий 5), причем в регионе стран NG1 сценарий 1 является верхним ограничением по мощности АЭ, а сценарий 5 – нижним. В группе стран NG2 сценарии по верхнему и нижнему ограничениям мощности меняются местами. В странах группы NG3 предусматривается один сценарий распределения мощностей АЭ до 2100 г., соответствующий базовому сценарию 3.

При такой концепции моделирования наибольший интерес представляют следующие характеристики рассматриваемых систем:

- баланс тепловых и быстрых реакторов в странах NG1 (рис. 1);
- количество потребленного природного урана в группе стран NG1, NG2 и NG3 (рис. 2);
- количество ОЯТ в группе NG1 (рис. 3).

ТОПЛИВНЫЙ ЦИКЛ И РАДИОАКТИВНЫЕ ОТХОДЫ

На указанных рисунках расчетные сценарии обозначены соответствующими номерами над диаграммами. Эти номера аналогичны номерам сценариев в табл. 1 – 5.

Представленные на диаграммах сценарии:

- сценарий 1 – минимальное количество ОЯТ; низкая доля мощности АЭ в странах NG2; максимальная переработка ОЯТ в странах NG1;
- сценарий 2 – высокий рост мощности АЭ в странах NG1 от 50% в 2008 г. до 65% к 2100 г.;
- сценарий 3 (базовый) – разбивка мощности АЭ по всем трем группам стран: 40, 40, 20% в 2100 г.;
- сценарий 4 – высокий рост мощности АЭ в странах NG2 от 50% в 2008 г. до 65% к 2100 г.;
- сценарий 5 – минимальная переработка ОЯТ; низкая доля мощности АЭ в странах NG1; максимальное количество ОЯТ в NG2.

Каждые два столбца диаграмм, относящихся к одному сценарию, включают в себя результаты двух вычислений значения определяемого параметра: левый столбец – при независимом развитии атомной энергетики в каждой группе стран; правый (отмеченный «звездочкой» *) – в условиях взаимодействия групп стран между собой (синергия). Когда эффект взаимодействия оказывает влияние на результат, между односценарными столбцами диаграммы появляется «ступенька» в ту или другую сторону в зависимости от направленности эффекта. Это условие справедливо для всех диаграмм, анализируемых ниже.

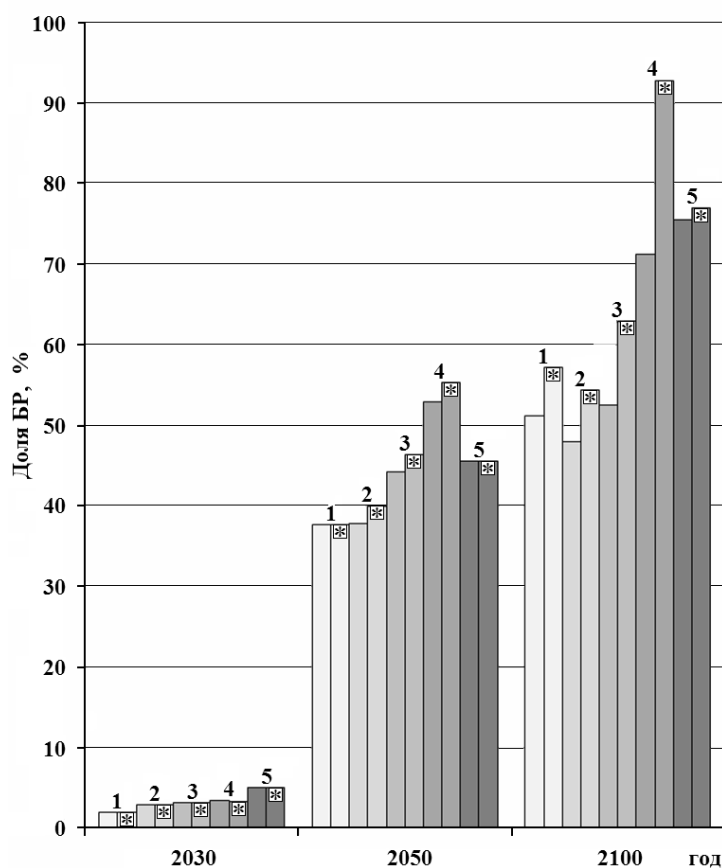


Рис. 1. Доля быстрых реакторов (БР) в структуре АЭ стран региона NG1

Из рисунка 1 видно, что в случае высокого роста мощностей мировой АЭ во всех

сценариях регионального развития до 2030 г. включительно доля быстрых реакторов в структуре энергетики стран NG1 не зависит от того, взаимодействуют или не взаимодействуют группы стран между собой. Однако после 2030 г. во втором, третьем и четвертом сценариях появляется эффект взаимодействия, вызвавший заметное увеличение доли БР в странах NG1. В 2100 г. разница между синергическим сценарием и сценарием независимого развития в этих пяти сценариях составляет 6, 6.5, 10.4, 21.6 и 1.5% соответственно по числу быстрых реакторов. Из рисунка также можно заключить, что доля БР в структуре АЭ сильно зависит от сценария наращивания мощностей в первой группе стран, а также от развития АЭ во второй группе. В целом к 2050 г. доля БР в странах NG1 может достичь 53–55% (без учета и с учетом взаимодействия), а к 2100 г. соответственно 71–93%, т.е. доля синергии составляет 21.6%.

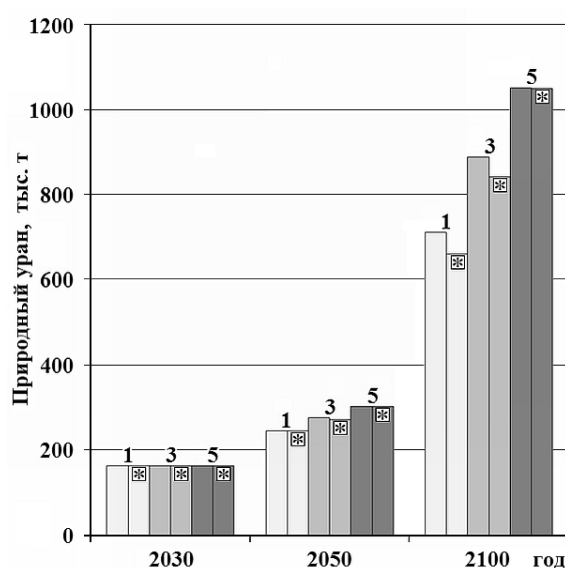


Рис. 2. Ежегодное потребление природного урана всеми регионами

На рисунке 2 представлено ежегодное потребление природного урана в группах стран. Это потребление минимально в сценарии 1 («Минимальное количество ОЯТ») и максимально в сценарии 5 («Минимальная переработка ОЯТ»). Потребление стабильно возрастает к концу столетия. При развитии мировой АЭ синергический эффект в тех сценариях, где он проявляется, например, в 2100 г. снижает годовое потребление природного урана на 30 – 40 тыс. т, хотя абсолютное годовое потребление, естественно, максимально в высоком варианте развития АЭ и достигает 1050 тыс. т в пятом сценарии (рис. 2).

На рисунке 3 представлена динамика накопления ОЯТ в регионе NG1 в разные временные промежутки при развитии мировой атомной энергетики. Здесь имеется особенность, проявляющаяся в том, что количество ОЯТ в сценариях 1–4 в 2100 г. больше, чем в 2050 г. Это объясняется тем, что в регионе NG1 с 2050 г. начинается интенсивный рост мощности АЭ, в том числе за счет большой доли блоков с реакторами БР в структуре атомной энергетики (рис. 1). Облученное ядерное топливо накапливается на складах по-разному. Для первых четырех сценариев в каждый из рассмотренных моментов времени наблюдается тенденция уменьшения количества накапливающегося ОЯТ от сценария 1 последовательно к сценарию 4. Синергия от взаимодействия наиболее сильно проявляется к 2100 г. в сценарии 5, увеличив количество накопившегося облученного топлива

ТОПЛИВНЫЙ ЦИКЛ И РАДИОАКТИВНЫЕ ОТХОДЫ

в девять с половиной раз по сравнению с предположением независимого развития регионов и превысив тем самым уровень 2030 г.

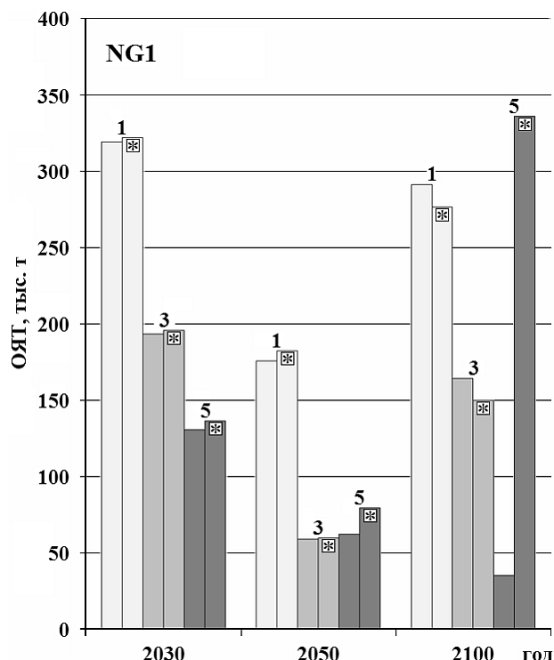


Рис. 3. Накопление ОЯТ в регионе NG1

Таким образом, наиболее опасным с точки зрения накопления ОЯТ является сценарий 5 «Минимальная переработка ОЯТ», в котором не очень сильно проявляясь в 2030 г. (136 тыс. т), начинается сильный рост запасов облученного топлива на складах, достигая к 2100 г. в регионе NG1 35 тыс. т ОЯТ при независимом развитии регионов и 336 тыс. т отработавшего топлива при синергии. Это максимальное количество ОЯТ в сравнении с другими сценариями высокого варианта. Оказывает влияние также количество ОЯТ, которое технологически невозможно перерабатывать из-за необходимости соблюдать время выдержки его в пристанционных хранилищах.

ВЫВОДЫ

Модельные сценарии глобального развития АЭ до 2100 г. являются взаимозависимыми и сформулированы таким образом, чтобы суммарная мощность АЭ по всем сценариям оставалась постоянной и равной 5000 ГВт к 2100 г. для высокого варианта развития и 2500 ГВт – для умеренного. Страны третьего региона NG3 (новички) имеют одинаковый сценарий развития в обоих вариантах.

При усилении роста АЭ в странах NG1 замедляется рост АЭ в странах NG2, и наоборот. При этом сумма мощностей АЭ всех регионов остается неизменной.

Расчетные исследования различных сценариев показали следующее:

- доля БР в первом регионе стран (NG1) зависит не только от темпа роста установленных мощностей в регионе, но и от роста мощностей в странах NG2;
- в сценариях совместного развития (синергия) атомной энергетики доля БР становится выше, чем при раздельном развитии регионов;
- при независимом развитии АЭ в регионах количество ОЯТ сокращается только в первом регионе, а во втором и третьем растет;
- в сценариях совместного развития объем ОЯТ во втором регионе стран растет быстрее, чем при раздельном развитии и поэтому возникает необходимость

планирования дополнительных объемов хранилищ на их территории. Снижение суммарного количества ОЯТ в мире при таком сценарии развития возможно только за счет первого региона, владеющего технологией его переработки. Объем ОЯТ в странах третьего региона в сценариях совместного развития становится минимальным.

Снижение потребностей в природном уране за счет БР, вводимых в первом регионе, делает использование урана экономически более эффективным для второго и третьего регионов.

Суммарное по всем регионам количество ОЯТ к 2100 г. будет минимальным в сценарии 1 «Минимальное количество ОЯТ – максимальная переработка ОЯТ в странах NG1». Высокий темп развития АЭ в странах первого региона оказывает существенное влияние на снижение суммарного ОЯТ.

Суммарное потребление природного урана будет минимальным также при высоком темпе развития АЭ в странах первого региона.

Сотрудничество в развитии АЭ, несомненно, будет выгодно и в итоге приведет к существенной экономии природного урана и постепенному снижению в мире количества ОЯТ.

Литература

1. Global architecture of innovative nuclear energy systems based on thermal and fast reactors including a closed nuclear fuel cycle (GAINS): A report of the international project on innovative nuclear reactors and fuel cycles (INPRO) IAEA NUCLEAR ENERGY SERIES No. NP-T-XX.
2. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, IAEA tools and Methodologies for Energy System Planning and Nuclear Energy System Assessments. IAEA brochure, 2009.
3. Егоров А.Ф., Коробейников В.В., Поплавская Е.В., Фесенко Г.А. Оценка чувствительности модели развития ядерной энергетики России к возможным изменениям выбранных экономических параметров // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2012. – №3. С. 53–62.
4. Егоров А.Ф., Коробейников В.В., Поплавская Е.В., Фесенко Г.А. Анализ сценариев развития глобальной АЭ, разработанных в рамках проекта GAINS. Расчетные исследования выбранных сценариев развития глобальной АЭ в предположении неоднородного развития мира с использованием программного комплекса MESSAGE / Препринт ФЭИ №3231, 2013.

Поступила в редакцию 14.02.2013 г.

presented. It is shown that efficiency of the direct conversion of the nuclear reactor thermal energy into the energy of directional flow light radiation can be high enough (80–90%).

УДК 629.039.58+331.44+316.6

Methodological principles of industrial enterprises personnels psychological education for work in high-risk conditions \ V.N. Abramova; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Hier Schools. Nuclear Power Engineering) – Obnibsk, 2013. 9 pages, 1 table, 1 illustration. – References, 3 titles.

Traditionally at universities industrial enterprise workers competence is mainly developed in the sphere of professional knowledge and skills.

Professionally important personal qualities are paid less attention to whereas these qualities, motives, and relations not in the less predetermine specialists success or failure. Persons psychological training for professional knowledge application in high-risk conditions is particularly important. Psychological training methodology contains approaches, scientific methods, and methodology of functional and structural activity analysis, psychology of developing professionally important skills including professional motivation and mental attitude toward high culture safety and organizational culture.

УДК 621.039.543.6

Computational studies of global nuclear energy development under the assumption of the worlds heterogeneous development \ A.F. Egorov, V.V. Korobeynikov, E.V. Poplavskaya, G.A. Fesenko; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Hier Schools. Nuclear Power Engineering) – Obnibsk, 2013. 8 pages, 5 tables, 3 illustrations. – References, 4 titles.

We study the mathematical model of Global nuclear energy development until the end of this century. For comparative scenarios analysis of transition to sustainable nuclear energy systems, we use models of heterogeneous world with an allowance for specific national development. Selected models are closely to real picture of the World of the future, according to international experts. Global Model Scenarios by end of 2100 yr are interdependent and formulated in such a way that the total capacity of Nuclear Energy development in all scenarios was constant and equal. There are two options in this scenarios: 5000 GW for high and 2,500 GW for moderate by the end of 2100 yr.

УДК 621.039.526:621.039.59

Minor actinides incineration in neutron spectra of uranium-235 or plutonium fission \ G.L. Khorasanov, A.I. Blokhin; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Hier Schools. Nuclear Power Engineering) – Obnibsk, 2013. 8 pages, 4 tables, 1 illustration. – References, 10 titles.

In the paper with the aim to incinerate minor actinides (neptunium, americium and curium) the possible ways of increasing the mean energy of neutrons in nuclear power installations are considered. These ways may be following: the usage of slow moderating coolant from lead–208 in innovative fast reactors, optimization of core dimensions in critical and subcritical reactors, the usage of high enriched fuel and at last considering the possibility of minor actinides incineration in neutron spectra of uranium-235 or plutonium fission.

УДК 621.039.526:621.039.51

Special aspects of the initial fuel loading phase in BN-1200 reactor core \ I.V. Malysheva, A.N. Tsarapkina, V.A. Eliseev, A.V. Egorov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Hier Schools. Nuclear Power Engineering) – Obnibsk, 2013. 6 pages, 1 table, 3 illustrations. – References, 4 titles.

Different methods are presented for excess reactivity reduction in the initial fuel loading