

## РЕАКТОРЫ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ (ДИНАМИКА ИНФОРМАЦИОННОГО МАССИВА БАЗЫ ДАННЫХ “МЕЖДУНАРОДНАЯ СИСТЕМА ЯДЕРНОЙ ИНФОРМАЦИИ”)

*А.Г.Шепелев, А.И.Тутубалин, Ю.А.Манжур, Л.В.Пантеенко, Л.Д.Юрченко*  
**ННЦ ХФТИ**

Проведено наукометричний аналіз інформаційних потоків, що відображають розвиток ядерної енергетики. Розглянуто основні типи реакторів нового покоління. Показано актуальність цієї області науки, оцінюється внесок провідних країн, виявлено розподіл робіт по видам публікацій.

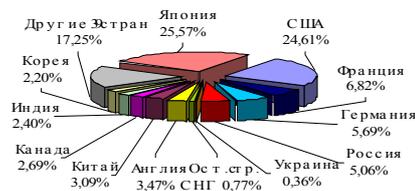
Проведен наукометрический анализ информационных потоков, отражающих развитие ядерной энергетики. Рассмотрены основные типы реакторов нового поколения. Показана актуальность этой области науки, оценивается вклад ведущих стран, выяснено распределение работ по видам публикаций.

A scientific-metric analysis has been performed for the information flows representing the development of nuclear power engineering. Basic types of new generation reactors are considered. The topicality of this field of science is demonstrated, the contribution of leading countries is estimated, the publication type distributions are described.

В конце XX века человечество столкнулось с целым рядом крупномасштабных техногенных катастроф. Тяжёлые аварии на АЭС Три-Майл-Айленд (1979г.) и Чернобыльской (1986г.) вызвали большой резонанс во всём мире (рис.1,2).



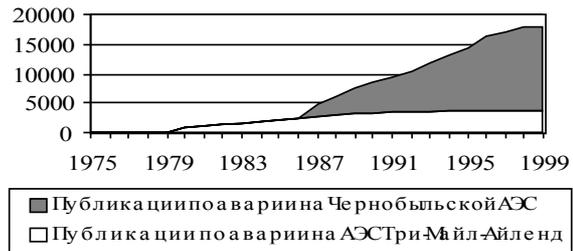
**Три-Майл-Айленд**



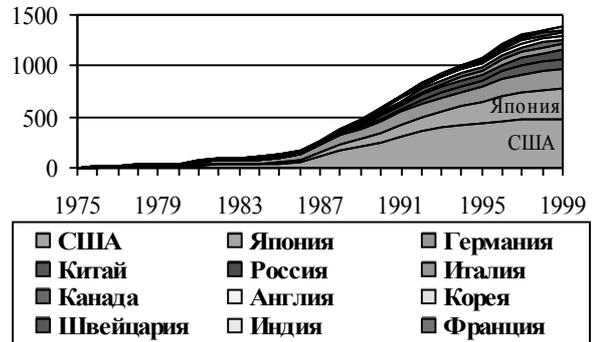
*Рис.1. Распределение публикаций стран по авариям на АЭС Три-Майл-Айленд и Чернобыльской*

С одной стороны, эти аварии замедлили развитие ядерной энергетики (вплоть до её сворачивания в некоторых странах), а с другой – во многих странах привели к росту разработок экономичных энергетических В связи с известной инерционностью энергетики как отрасли с большими капитальными за-

тратами и большим сроком амортизации развитие ядерной энергетики идёт в двух направлениях, которые можно условно назвать эволюционным [1,2] и революционным [3,4].



*Рис. 2. Кумулятивный рост числа публикаций по авариям на АЭС Три-Майл-Айленд и Чернобыльской-реакторов нового поколения с пассивной и внутренне присущей безопасностью (рис.3).*



*Рис. 3. Кумулятивный рост числа публикаций основных стран по реакторам с пассивной и внутренне присущей безопасностью*

На основе имеющейся в нашем распоряжении полной Базы Данных МАГАТЭ «International Nuclear Information System»-INIS (1970-2000гг.) мы провели автоматизированный анализ динамики информаци-

онных потоков по обоим направлениям. Анализ проводился по более чем 80 ключевым словам и понятиям, и было детально проанализировано более 35 тысяч информационных документов.

### 1. ЭВОЛЮЦИОННОЕ НАПРАВЛЕНИЕ

Эволюционный путь развития направлен на модернизацию и совершенствование существующих типов реакторов с целью упрощения конструкций, удешевления строительства и особенно придания им свойств пассивной и внутренне присущей безопасности.

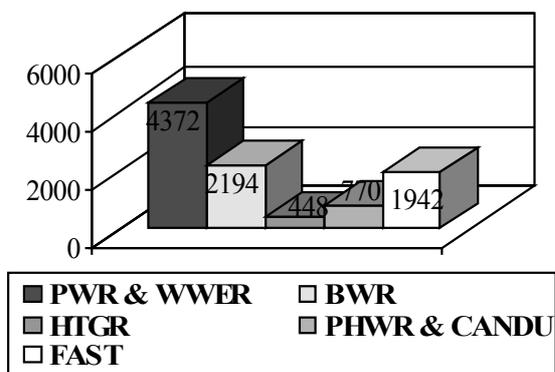


Рис. 4. Распределение публикаций последних 10-ти лет по типам реакторов

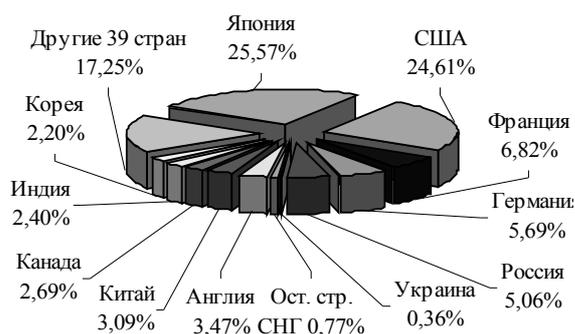


Рис. 5. Распределение публикаций стран последних 10-ти лет по энергетическим реакторам

При анализе мы подробно рассмотрели 5 основных типов энергетических реакторов: легководных с водой под давлением (PWR, WWER); кипящих (BWR); высоко-температурных газоохлаждаемых (HTGR); с тяжелой водой под давлением (PHWR, в том числе CANDU), а также реакторов на быстрых нейтронах (Fast). Другим типам реакторов посвящено меньшее число публикаций. На рис.4 представлен анализ публикаций последних 10 лет по исследованиям и разработкам рассматриваемых реакторов, выполненным в 50 странах мира (см. рис.5). На рис.6 и 7 показано распределение публикаций 1990-1999 гг. по этим же пяти типам реакторов нового поколения и доля стран в соответствующих публикациях. Сравнение рис.7 и рис.5 показывает возрастающий вклад Ю.Кореи и Китая в разработку таких реакторов.

Из сравнения рис.4 и рис.6 можно заметить, что

реакторы типа CANDU привлекают меньше внимания в качестве перспективных, в то время как высокотемпературные газоохлаждаемые реакторы рассматриваются как более предпочтительные по сравнению с ними (см. также [2]).

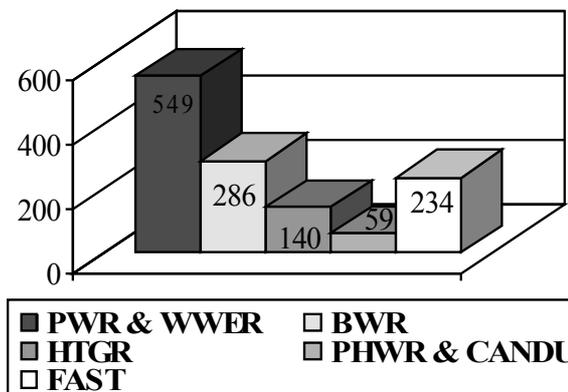


Рис. 6. Распределение публикаций последних 10-ти лет по типам реакторов нового поколения

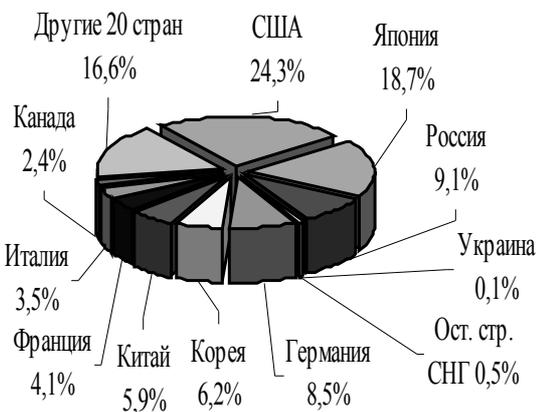


Рис. 7. Распределение публикаций стран последних 10-ти лет по реакторам нового поколения

Анализ публикаций показывает, что на ближайшую перспективу легководные реакторы (PWR, WWER и BWR), по-видимому, будут преобладающими.

Учитывая тяжёлые необратимые последствия для климата Земли, к которым может привести развитие традиционной энергетики, создан целый ряд национальных и международных программ разработки следующего поколения реакторов: США («US Advanced Light Water Reactor Development Program» и «US DOE Advanced Liquid Metal Reactor Program»), Европы (REP - 2000), Франции (CEA R&D Program for Water Nuclear Reactors), «Концепция развития ядерной энергетики России», «Южно-Корейская программа совершенствования ядерной энергетики», «Долгосрочная программа исследования, развития и использования атомной энергии Японии», «Национальная программа ядерной энергетики Китая». В результате осуществления указанных программ разработаны проекты реакторов ново-

го поколения; таблица I содержит данные о проектах, которым посвящено более 30 публикаций. В настоящее время просматривается тенденция одновременной разработки легководных энергетических реакторов большой электрической мощности (>1000

МВт) и реакторов средней мощности (~600 МВт). При этом, зачастую, разработки ведутся в рамках международной кооперации.

**ТАБЛИЦА 1.**

**НЕКОТОРЫЕ ПРОЕКТЫ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ**

Страна	Название проекта	Тип реактора, мощность (эл.), МВт.	Кол. публ	Примечания
США	SBWR	Simplified BWR, 670	261	Совместно с Японией
	AP-600	Advanced Passive PWR, 600	388	
	System 80 <sup>+</sup>	PWR, 1350	251	
	ABWR	Advanced BWR, 1350	330	
	MHTGR	Modular High-Temp. Gas-cooled Reactor	291	
Россия	IFR	Integral Fast Reactor	390	
	SAFR	Sodium Advanced Fast Reactor, 450	77	
	PRISM	Power Reactor Inherently Safe Module, 465	165	
	ВПБР-600	Водяной Пассивный Безопасный Реактор, WWER, 600	28	
Россия	ВВЭР-640 (В-407)	WWER, 500-600	129	
	ВВЭР-1000 (В-392)	WWER, 1000	50	
	БН-800	Реактор на быстрых нейтронах, 800	116	
Франция	EPR	European Pressurized Reactor, PWR 1500	378	Совместно с Германией и др. европ. парт.
Франция/ Англия	ESBWR	European Simplified BWR, 1200	42	Совместно с др. европ. парт.
	"Superphenix"	Fast neutron reactor, 1200	383	
Германия	SWR-1000	BWR, 1000	52	Совместно с европ. парт.
Швеция	BWR-90	BWR, 1180	35	
	PIUS	Process Inherent Ultimate Safety, PWR, 640	200	
Япония	NP21 (New PWR 21)	SPWR (System-integrated PWR) ~1300	45	Гибридная система безопасности Совм. с США
	ABWR	Advanced BWR, 1300	330	
	"Monju"	Prototype Fast Breeder Reactor, 280	53	
Ю. Корея	CP-1300 (KNGR)	Korean Next Generation Reactor, PWR, 1300	73	
	KALIMER	Korea Advanced Liquid Metal Reactor, 330	43	
Китай	CAP 600	PWR, 600	39	На основе АС 600

Результаты анализа публикаций стран по каждому из рассмотренных нами пяти типов реакторов нового поколения представлены на рис.8. Следует учесть, что данные диаграмм содержат и работы, посвященные сравнению реакторов нового поколения с ныне действующими, что объясняет, к примеру, заметную долю работ России по реакторам типа CANDU. Отметим, что публикации США и Японии фактически лидируют в разработках всех типов реакторов, кроме CANDU. Наибольшая доля публикаций по высокотемпературным газоохлаждаемым реакторам относится к Германии.

На рис.9,10 изображены распределения публикаций, посвященных реакторам нового поколения по типам публикаций и языкам, а на рис.11,12 - распределения всех публикаций в INIS по типам публикаций и языкам. Из сравнения видна роль конференций и то, что английский язык в новых областях ядерной науки и техники доминирует.



Рис. 8. Распределение публикаций стран по каждому из типов реакторов нового поколения за последние 10 лет

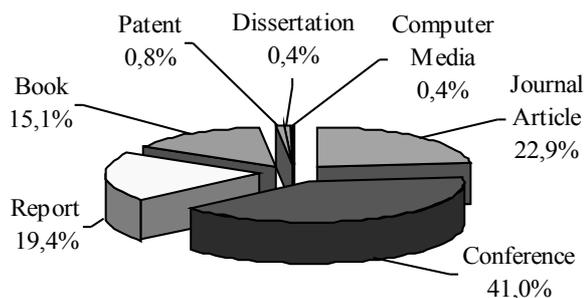


Рис. 9. Типы публикаций по реакторам нового поколения за последние 10 лет

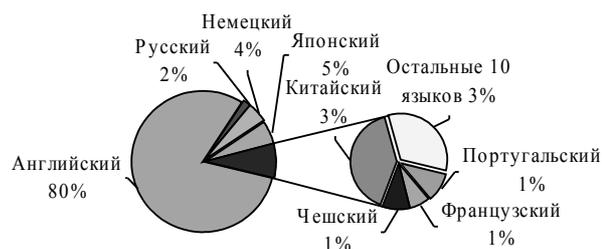


Рис. 10. Распределение по языкам публикаций по реакторам нового поколения за последние 10 лет

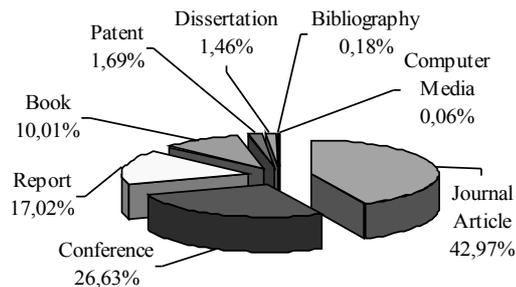


Рис. 11. Типы всех публикаций в БД INIS

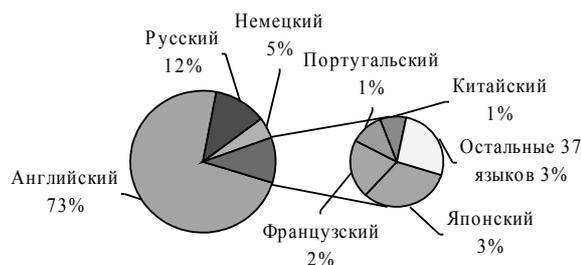


Рис. 12. Распределение всех публикаций по языкам в БД INIS

## 2. РЕВОЛЮЦИОННОЕ НАПРАВЛЕНИЕ

Революционный путь развития связан с разработкой и созданием реакторов, основанных на новых принципах с полным использованием внутренних присущих и пассивных свойств безопасности и применяющих различные топливные циклы, включая ториевый цикл, сжигание плутония и трансурановых элементов, трансмутацию наиболее опасных радионуклидов, а также термоядерный синтез.

Нами рассмотрены разработки двух типов устройств: энергетических термоядерных реакторов и электроядерных установок; по предложенному Э.Теллером с сотрудниками [5] полностью автоматизированному высокотемпературному реактору под-земного базирования в БД INIS введено всего три информационных документа.

На рис.13 показан кумулятивный рост числа публикаций основных стран по проблеме получения энергии термоядерным синтезом. Видно, что поддерживается постоянный интерес к этой проблеме примерно в 50 странах (см. рис.14). Из сравнения рис.15, 16 и рис.11, 12 видно, что это устоявшееся научное направление.

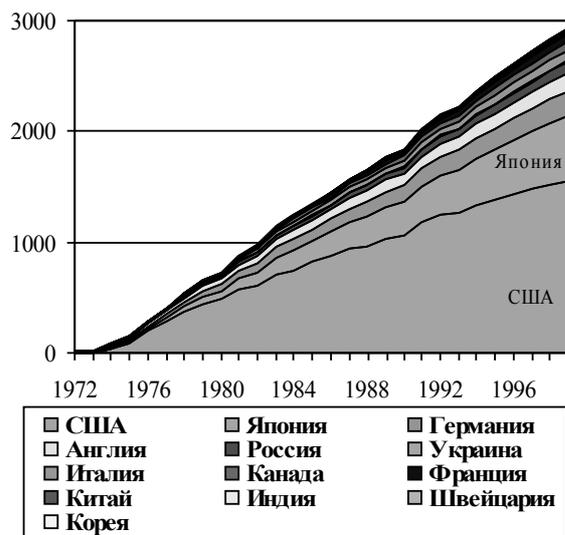


Рис.13. Кумулятивный рост числа публикаций основных стран по проблеме получения энергии термоядерным синтезом

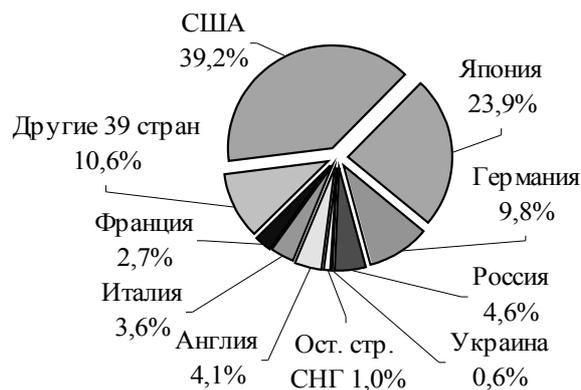


Рис. 14. Распределение публикаций стран по энергетическим термоядерным реакторам

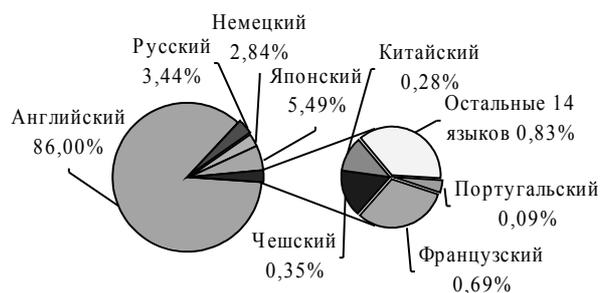


Рис. 15. Распределение по языкам публикаций по проблеме получения энергии термоядерным синтезом

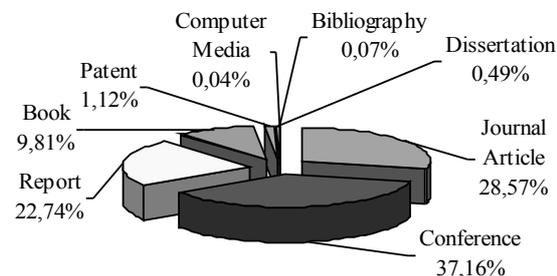


Рис. 16. Типы публикаций по проблеме получения энергии термоядерным синтезом

Известная ранее идея электроядерной установки, использующей пучки ускоренных заряженных частиц и подкритические реакторы, в последние годы, с улучшением параметров линейных ускорителей и циклотронов, нашла конкретные решения в виде проектов ADTT - *Accelerator-Driven Transmutation Technologies* и EA - *Energy Amplifiers* (см. работы [3, 4] и последующие, например, труды конференции [6] и препринт [7]). Из сравнения динамики публикаций по электроядерным установкам (рис.17) и термоядерным реакторам (рис.13) можно полагать, что электроядерный способ получения энергии имеет более близкую перспективу практической реализации (см. также [8,9]).

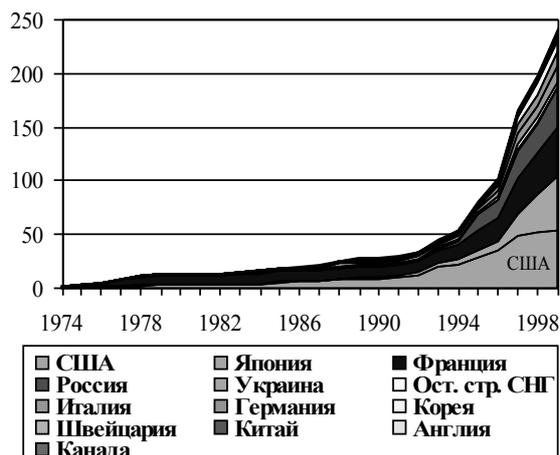


Рис. 17. Кумулятивный рост числа публикаций основных стран по проблемам получения энергии электроядерным способом

Ещё большее применение электроядерный метод, по-видимому, может получить [10] для решения стоящих перед человечеством острых проблем избавления от радиоактивных отходов (рис.18) и нераспространения ядерного оружия. Анализ рис.19 и 20 в сравнении с рис.11 показывает резко возросшую роль компьютерных носителей информации в бурно развивающихся направлениях современной науки и техники. Рис. 21, 22 по сравнению с рис.12, к сожалению, показывают тенденцию к уменьшению числа публикаций на русском языке по данной тематике. Таким образом, проведенное нами исследование показало, что Чернобыльская авария оказала существенное влияние на развитие атомной энергетики в направлении создания более простых систем с внутренне присущей безопасностью, а также выявило взрывной интерес в последние 6 лет к проблемам использования электроядерного способа получения энергии и избавления от радиоактивных отходов. Представляется несомненным значение такого рода аналитических исследований для прогнозирования развития энергетики будущего.



Рис. 18. Кумулятивный рост числа публикаций основных стран по дожиганию и трансмутации

РАО электроядерным способом

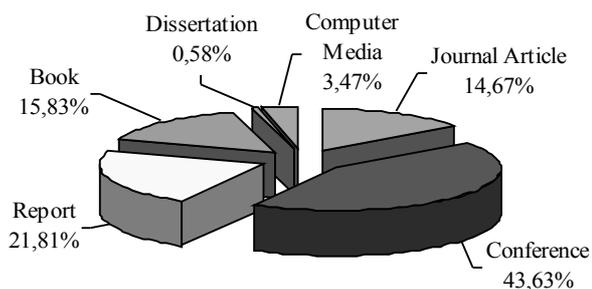


Рис. 19. Типы публикаций по проблемам получения энергии электроядерным способом

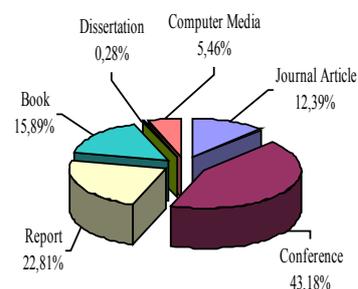


Рис. 20. Типы публикаций по дожиганию и трансмутации РАО электроядерным способом



Рис. 21. Распределение по языкам всех публикаций по проблемам получения энергии электроядерным способом

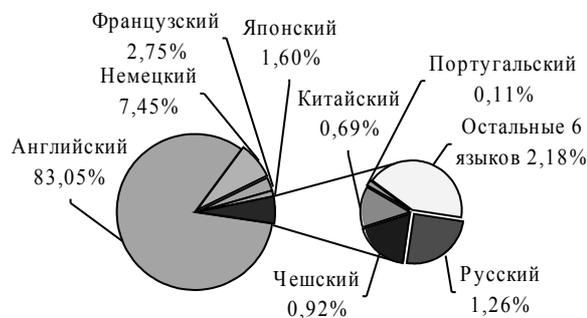


Рис. 22. Распределение по языкам всех публикаций по дожиганию и трансмутации РАО электроядерным способом

Создание реакторов нового поколения ставит

сложные проблемы, требующие углубленных исследований во многих областях науки и техники, в том числе и в области радиационного материаловедения.

Авторы выражают признательность А.П.Чернову и Ю.П.Курило за поддержку работы, И.М.Неклюдову, И.М.Карнаухову, Н.А.Хижняку, В.С.Красноручкому, В.Н.Воеводину, Н.П.Одейчуку, Б.А.Шиляеву за интересные обсуждения.

#### ЛИТЕРАТУРА

- 1.1.П.Н.Алексеев, Ю.А.Гагаринский, Н.Н.Пономарёв-Степной и др.. Требования к атомным станциям XXI в. // *Атомная энергия*. 2000, т.88, вып.1, с. 3-14.
- 2.2.В.В.Лозовецкий. Новое о перспективных ядерных реакторах. // *Ат. техн. за рубежом*. 2000, №2, с.14-19.
- 3.3.C.D. Bowman, E.D.Arthur, P.W.Lisowski et al. *Nuclear energy generation and waste transmutation using an accelerator-driven intense thermal neutron source*. 6. Intern. Conf.on Emerging Nuclear Energy Systems. Monterey, CA(United States), 16-21 Jun 1991.
- 4.4.C.Rubbia. *High energy particle accelerators for bulk transformation of elements and energy generation*. 38.IAEA General Conf., Special Scientific Programme on Use of High Energy Accelerators for Transmutation of Actinides and Power Production. Vienna. 21 Sep 1994.
- 5.E.Teller, M.Ishikawa, L.Wood. *Completely automated nuclear reactors for long-term operation*. Joint American Physical Society and The America Association of Physics Teachers Texas Meeting. TX, 26-28 Oct 1995.
- 6.*Proc. of the Second Intern. Conf. on Accelerator-Driven Transmutation Technologies and Applications*, June 3-7, 1996, Kalmar, Sweden (ed. H.Conde) Uppsala University, 1997.
- 7.*The TARC Collaboration. Neutron-Driven Transmutation by Adiabatic Resonance Crossing*. CERN-SL-99-036EET, Geneva, July 26, 1999
- 8.T.Sacks. Nuclear nirvana?. Thorium fuel; Rubbia., // *Electrical Review* London., 10 Jun 1997, v.230(12). p. 24-26.
- 9.A.Abanades, R.Nunez-Lagos, A.Perez-Navarro et al. Preliminary Studies of the Demonstration Plant of the Energy Amplifier (EA) by LAESA. 24 Reunion annual de la Sociedad Nuclear Espanola, Valladolid 14-16 Octubre 1998, Madrid (Spain), // *Senda Editorial*. 1998, p. 23-31.
- 10.P.Landeyro, M.Guidotti. Accelerator-driven System: Their Application to the Incineration of Long-lived Radioactive Waste. // *J.Nucl. Sci. & Techn.* 1997, v.34, N2, p.156-166.