

УДК 621.039.54

**ЭЛЕКТРОЯДЕРНАЯ ЭНЕРГЕТИКА: ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ.  
АНАЛИЗ БАЗ ДАННЫХ INIS И SCOPUS****В.Ф. Клепиков<sup>1</sup>, В.Ю. Корда<sup>1</sup>, А.Г. Шепелев<sup>2</sup>, А.С. Молев<sup>1</sup>,  
Л.П. Корда<sup>2</sup>, О.В. Немашкало<sup>2</sup>, Т.А. Пономаренко<sup>2</sup>, Л.Д. Юрченко<sup>2</sup>**<sup>1</sup>Институт электрофизики и радиационных технологий НАН Украины, 61002, Харьков, ул. Чернышевского, 28, а.я. 8812<sup>2</sup>ННЦ «Харьковский физико-технический институт» НАН Украины, 61108, Харьков, ул. Академическая, 1

Поступила в редакцию 1 декабря 2005 г.

С целью определения мировых тенденций развития электроядерных (управляемых ускорителями) систем для безопасного производства ядерной энергии и трансмутации ядерных отходов проанализированы тексты около 4000 рефератов по тематике исследования, содержащихся в двух полных Международных базах данных (БД): "International Nuclear Information System" (INIS) и политематическая SCOPUS. Динамика информационных потоков по исследуемой теме имеет характер быстрого роста количества публикуемой информации. Результаты исследований свидетельствуют об актуальности, перспективности и необходимости развития электроядерных технологий в Украине.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** электроядерные системы, управляемые ускорителями установки, подкритические сборки, усилители энергии, трансмутация, ядерные отходы.

Существует общее устойчивое убеждение, что промышленное производство энергии с помощью ядерно-физических методов в XXI веке должно удовлетворять следующим условиям (см., например, [1-5]):

1. Детерминистическая, т.е. обусловленная законами природы, а не сложностью защитных технологий, безопасность. Применяемые сейчас ядерные системы крайне неустойчивы в отношении ошибок обслуживающего их персонала, природных катаклизмов (землетрясения, наводнения и т. д.) и, что особенно актуально, спланированных террористических действий.
2. Принципиальная, т.е. обусловленная законами природы, а не уровнем охраняемости, невозможность распространения ядерных технологий и материалов для производства ядерного оружия.
3. Минимальная суммарная радиотоксичность нарабатываемых долгоживущих отходов.
4. Возможность эффективной трансмутации накопленных к настоящему времени радиоактивных отходов существующих ядерных установок.
5. Существенное увеличение глубины выгорания уже используемого ядерного топлива, повторное использование отработанного топлива, вовлечение в топливный цикл новых элементов, имеющих в изобилии в природе (например, торий), а также элементов, нарабатываемых в процессе функционирования ядерных установок.

Анализ указанных выше условий естественно приводит к идее применения ускорителей частиц для "подсветки" ядерно-физических установок, которые, при этом, могут функционировать в "подкритическом" режиме, компенсируя недостаток нейтронов в активной зоне за счет дополнительного их притока от нейтронного источника, управляемого ускорителем. Следовательно, представляет интерес выяснить текущее состояние работ по исследованию и применениям управляемых ускорителями систем для безопасного производства ядерной энергии и трансмутации ядерных отходов.

Мы проанализировали две полные Международные базы данных: "International Nuclear Information System" (INIS) и политематическая SCOPUS. Первая содержит более 2,4 млн. рефератов статей из журналов, отчетов и др. информационных документов по мирному использованию атомной энергии, введенных государствами-членами МАГАТЭ с 1970 года. Вторая охватывает рефераты из 14 тыс. наименований журналов с 1966 года. В каждой из них мы провели автоматизированный анализ динамики информационных потоков по следующим ключевым словам: *accelerator driven*, *electronuclear*, *energy amplifier* и *subcritical assembly*. Общее количество найденных рефератов составило около 4000. В то же время анализ текстов рефератов показал, что ссылки в значительной мере перекрываются и поэтому мы ограничились ключевыми словами *accelerator driven* и *electronuclear*, дополнительно отбросив рефераты, не относящиеся прямо к теме исследования.

**РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ БД INIS И SCOPUS**

Общее число найденных рефератов в БД INIS составило 2269 по тематике *accelerator driven systems* (рис. 1) и 278 по *electronuclear systems* (рис. 2). Общее число найденных рефератов в SCOPUS составило 487 по тематике *accelerator driven systems* (рис. 3) и 99 по *electronuclear systems* (рис. 4).

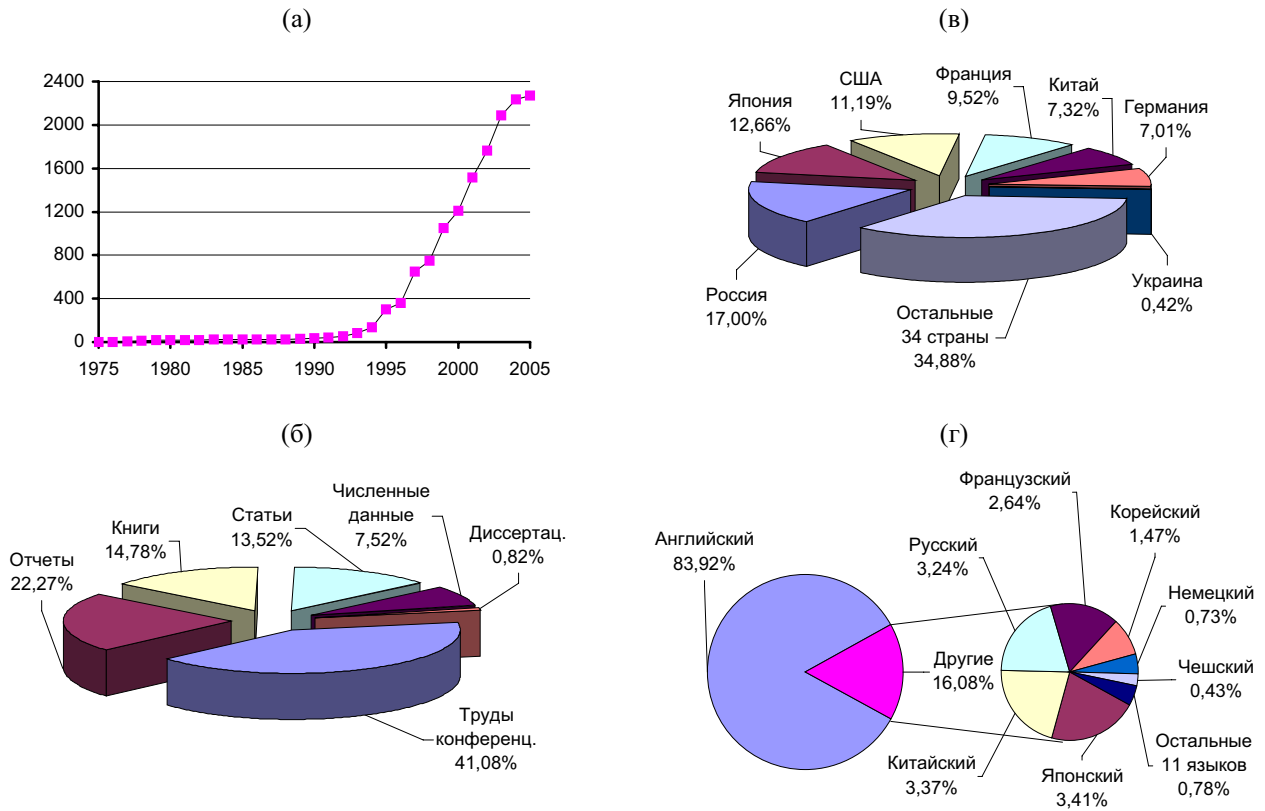


Рис.1. Результаты анализа БД INIS по теме: системы, управляемые ускорителями (accelerator driven systems). (а) Кумулятивный рост числа публикаций. (б) Распределение по типам опубликованных материалов. (в) Вклад специалистов разных стран в проведение работ по тематике. (г) Распределение публикаций по языкам.

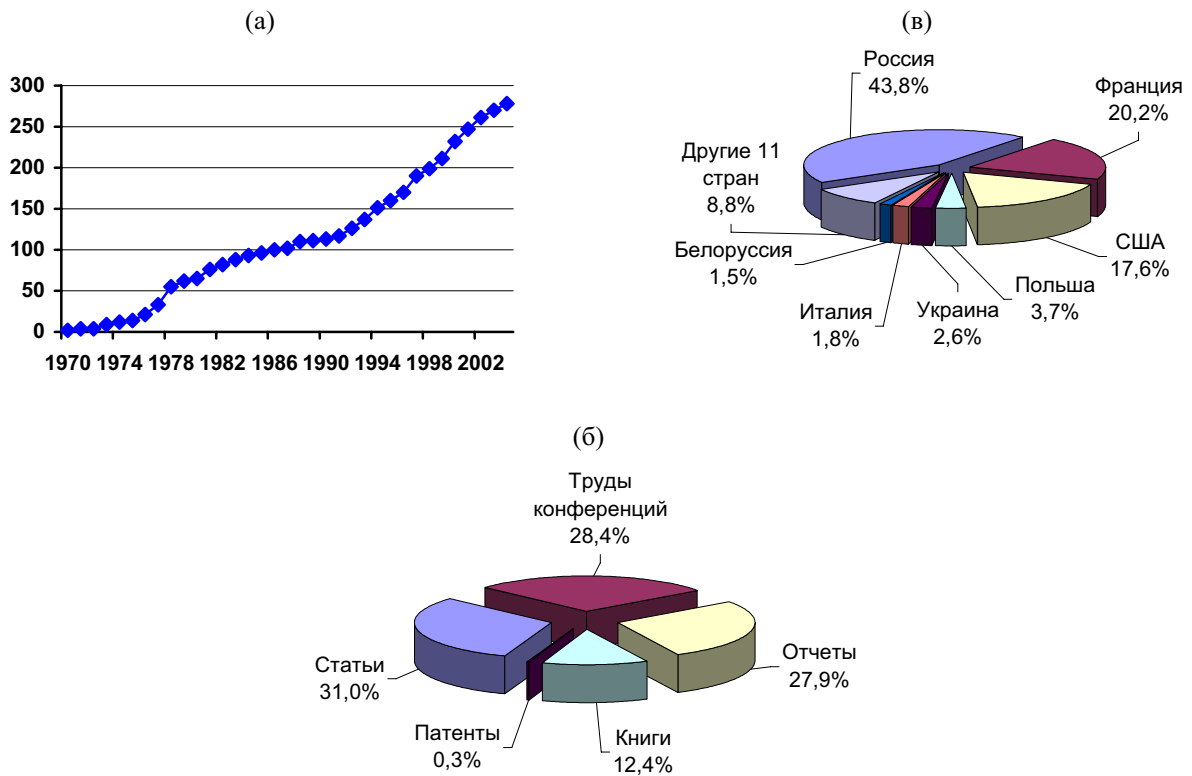


Рис.2. Результаты анализа БД INIS по теме: электроядерные системы (electronuclear systems). (а) Кумулятивный рост числа публикаций. (б) Распределение по типам опубликованных материалов. (в) Вклад специалистов разных стран в проведение работ по тематике.

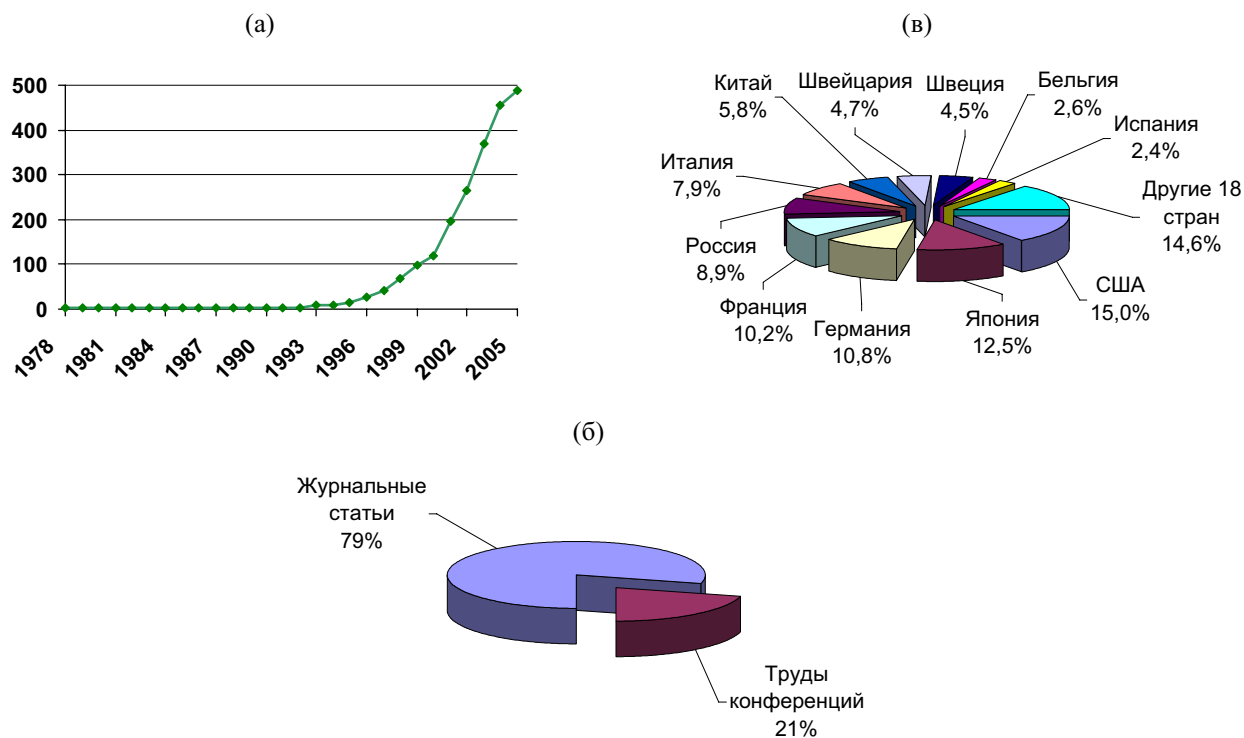


Рис.3. Результаты анализа SCOPUS по теме: системы, управляемые ускорителями (accelerator driven systems). (а) Кумулятивный рост числа публикаций. (б) Распределение по типам опубликованных материалов. (в) Вклад специалистов разных стран в проведение работ по тематике.

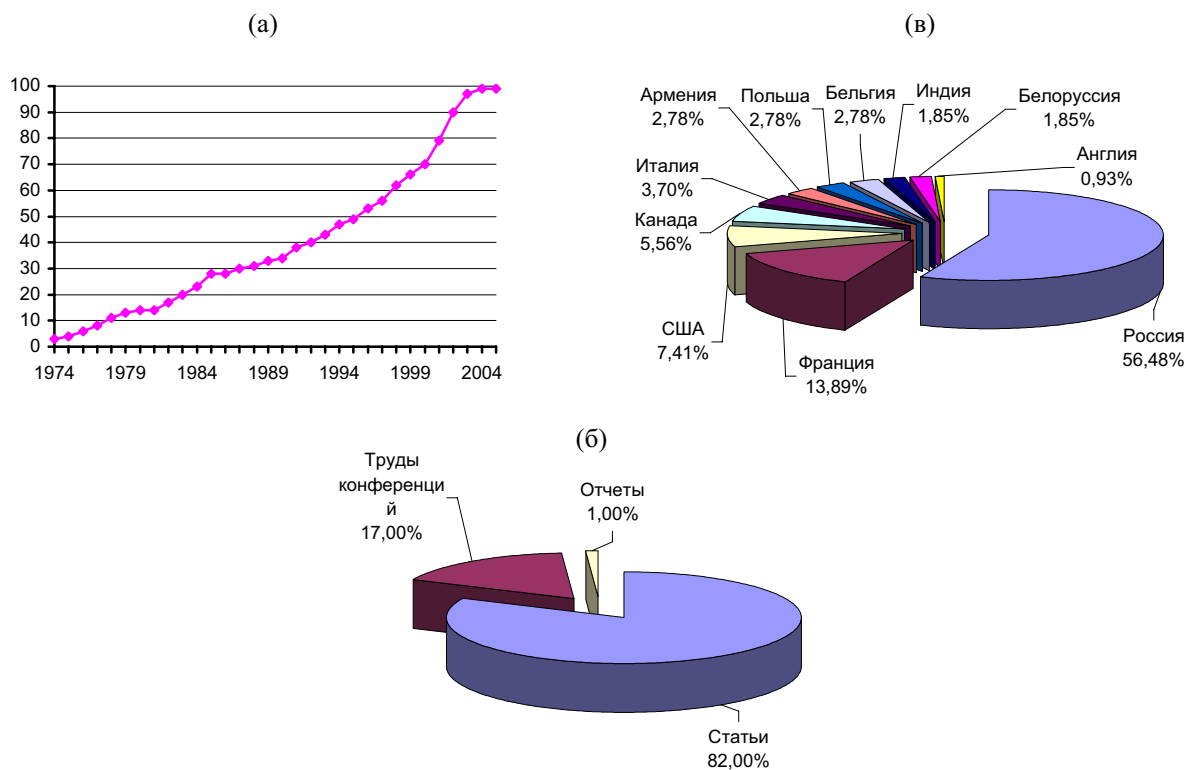


Рис.4. Результаты анализа SCOPUS по теме: электроядерные системы (electronuclear systems). (а) Кумулятивный рост числа публикаций. (б) Распределение по типам опубликованных материалов. (в) Вклад специалистов разных стран в проведение работ по тематике.

### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Сравнение рис. 1а и рис. 3а, а также рис. 2а и рис. 4а показывает, что характеры кривых кумулятивного роста числа публикаций в БД INIS и SCOPUS весьма схожи. Так как основная часть материалов, обнаруженных в БД INIS представляет собой труды конференций и отчеты (рис. 1б и 2б), а в БД SCOPUS представлены в основном журнальные статьи (рис. 3б и 4б), тематика электроядерной энергетики объективно актуальна. Стремительное нарастание числа публикаций по системам, управляемым ускорителями (accelerator driven systems) в БД INIS начинается в период с 1992 по 1994 год (момент возобновления интереса к тематике после почти 40-летнего перерыва (см., например, [6-10])), в то время как аналогичное событие в БД SCOPUS запаздывает на 2-3 года, что можно пояснить спецификами исследуемых БД: конференции по актуальным темам обычно часто проводятся, их материалы (рис. 1б) обычно содержат большое число рефератов и публикуются значительно быстрее журнальных статей (рис. 3б). Динамика роста информационных ресурсов по электроядерным системам (electronuclear systems) оказывается значительно более плавной, что объясняется спецификой самого термина “электроядерная установка”, являющегося чисто русским (рис. 2в и рис. 4в). Рис. 1в, 2в, 3в и 4в свидетельствуют, что лидерами в проведении работ по исследуемой теме являются Россия и США (как страны, обладающие большими запасами оружейного ядерного топлива, с одной стороны, и большими объемами отработанных ядерных отходов, с другой) и Япония (как страна, не обладающая возобновляемыми энергетическими ресурсами). Далее можно отметить большой вклад специалистов Германии, Франции, Италии и Китая. Обращает на себя внимание существенная роль специалистов из Индии в международных проектах по данной тематике, что неудивительно, т.к. Индия обладает огромными запасами тория и быстро развивающейся экономикой.

### ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ЭЛЕКТРОЯДЕРНЫЕ СИСТЕМЫ

Анализ текстов рефератов публикаций в изучаемых БД позволяет определить основные тенденции развития ядерных технологий, использующих ускорители частиц. Основываясь на детальном изучении полученной информации, прежде всего следует отметить, что к настоящему времени особенности электроядерных установок для генерации энергии достаточно хорошо проработаны путем многочисленных математических экспериментов с различными типами систем [11]. В то же время для выбора оптимальных режимов трансмутации долгоживущих элементов требуется большая экспериментальная и теоретическая работа, т.к. в электроядерных реакторах будет нарабатываться большое количество не встречающихся в природе изотопов, особенности распадов которых пока слабо изучены [11].

Схема современной электроядерной установки может включать ускоритель протонов, мишенный комплекс (например, на основе свинец-висмутовой эвтектики), преобразующий высокоэнергетические протоны в нейтроны, и подкритический жидкосолоевой реактор, топливная смесь которого (возможно, на ториевой основе) одновременно является эффективным теплоносителем, исключая тем самым необходимость в большом количестве специальных конструкционных материалов в рабочей зоне. Наиболее оптимальными и перспективными сегодня считаются каскадные двух (и, возможно, более) реакторные подкритические системы, состоящие из реактора на быстрых нейтронах (поджигаемого комплексом ускоритель-мишень и многократно усиливающего поток нейтронов), работающего в жестком нейтронном спектре и реактора на тепловых нейтронах (поджигаемого потоком быстрых нейтронов из первого реактора), работающем в мягком нейтронном спектре. Такая организация электроядерной установки позволяет производить энергию в реакторе на тепловых нейтронах, эффективно трансмутировать весь спектр ядерных отходов критических реакторов как в жестком, так и в мягком нейтронных спектрах (в зависимости от типа долгоживущего изотопа), а также, что весьма важно, существенно снизить требования к токам протонных ускорителей [11].

Изучается также схема, в которой управляющим элементом является ускоритель электронов. Пучок таких высокоэнергетических частиц падает на мишень (например, из вольфрама) и генерирует мощный поток гамма-квантов, которым облучается ядерное топливо в рабочей зоне подкритического реактора. В результате образуется стандартный набор продуктов деления и выделяется достаточно большое количество энергии. Далее за счет фотоядерных реакций такие продукты распадаются и превращаются в стабильные изотопы. Важно, что при этом нет необходимости в химической сепарации отработанного топлива [12].

### ВЫВОДЫ

Таким образом, описанные электроядерные установки принципиально удовлетворяют всем требованиям, предъявляемым к ядерно-физическим системам крупномасштабного производства ядерной энергии в XXI веке, отмеченным во введении. Учитывая, что более половины потребляемой электроэнергии в Украине производится на ядерных электростанциях и существует тенденция к увеличению доли ядерной энергетики в энергетическом балансе страны, участие в международных проектах по электроядерным технологиям и развитие собственной электроядерной индустрии в Украине следует признать жизненно необходимым.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Васильков В.Г. и др. Электроядерный метод генерации нейтронов // АЭ -1970. - Т. 29. - С. 121-135.
2. Барашенков В.С. Ядерно-физические аспекты электроядерного метода // ЭЧАЯ -1978. - Т. 9. - Вып. 5 - С. 871-921.

3. Nifenecker H., David S., Loiseaux J.M., Meplan O. Basics of accelerator driven subcritical reactors // Nucl. Instr. Meth. A. - 2001. - V. 463. - P. 428-467.
4. Бзнуни С.А., Барашенков В.С., Жамкоян В.М., Соснин А.Н., Полянски А., Худавердян А.Г. Перспективные электро-ядерные системы // ЭЧАЯ -2003. - Т. 34. - Вып. 4 - С. 977-1032.
5. Бомко В.А., Карнаузов И.М., Лапшин В.И. Усилитель мощности – основа ядерной энергетики XXI века // Обзор – Харьков: ННЦ ХФТИ, 2001. – 52с.
6. Carminati F. et al. Energy amplifier for cleaned inexhaustible nuclear energy production driven by particle // Report CERN-AT-93-47-ET. - 1993.
7. Bowman C.D. et al. Nuclear energy generation and waste transformation using an accelerator driven intense thermal neutron source // Nucl. Instr. Meth. A. - 1992. - V. 320. - P. 336-367.
8. Furukawa K. et al. The combined system of accelerator molten-salt breeder (AMSB) and molten-salt converter reactor (MSCR) // Japan-US Seminar on Thorium Fuel Reactors, Nara, Japan, Oct. 1982.
9. Buono S. et al. A realistic plutonium elimination scheme with fast energy amplifiers and thorium-plutonium fuel // Report CERN-AT-95-53-ET. - 1995.
10. Buono S. et al. Conceptual design of a fast neutron operated high power energy amplifier // Report CERN-AT-95-44-ET. - 1995.
11. Барашенков В.С. “Электрояд” – истоки и будущее (ресурсы атомной энергетики) // Препринт ОИЯИ P2-2003-144.
12. Brown P.M. Effective radioactive waste remediation // Journal of New Energy. – 2001. - V. 5. – P. 22-34.

**ELECTRONUCLEAR POWER INDUSTRY: RESEARCH AND DEVELOPMENT TRENDS.  
ANALYSIS OF INIS AND SCOPUS DATA BASES**

**V.F. Klepikov<sup>1</sup>, V.Yu. Korda<sup>1</sup>, A.G. Shepelev<sup>2</sup>, A.S. Molev<sup>1</sup>, L.P. Korda<sup>2</sup>, O.V. Nemashkalo<sup>2</sup>,  
T.A. Ponomarenko<sup>2</sup>, L.D. Yurchenko<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>*Institute of Electrophysics and Radiation Technologies, National Academy of Sciences of Ukraine, 28, Chernyshevsky st., p.o. box 8812, Kharkov, 61002*

<sup>2</sup>*NSC “Kharkov Institute of Physics and Technology”, National Academy of Sciences of Ukraine, 1, Akademicheskaya st., Kharkov, 61108*

Being aimed at determining the international trends of research and development of the electronuclear (accelerator driven) systems for safe nuclear power production and nuclear waste transmutation, we have analyzed the content of about 4000 records, associated with the problem under study, found in two complete International Data Bases: “International Nuclear Information System” (INIS) and multisubject SCOPUS. We have observed a dramatic increase in number of various publications devoted to the problem. This study makes us able to claim the importance, availability and necessity of developing electronuclear (accelerator driven) technologies in Ukraine.

**KEY WORDS:** electronuclear systems, accelerator driven systems, subcritical assemblies, energy amplifiers, transmutation, nuclear wastes.