

## РАЗРАБОТКА КОНЦЕПЦИИ СОЗДАНИЯ СИЛЬНОТОЧНЫХ РАДИАЦИОННО-ЧИСТЫХ УСКОРИТЕЛЕЙ ПРОТОНОВ И ДЕЙТРОНОВ ДЛЯ ЭЛЕКТРОЯДЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

*Е.В. Гусев, П.А. Демченко, А.М. Егоров, Б.И. Иванов, В.Г. Папкович, Н.Г. Шулика*  
*Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»*

*Харьков, Украина*

*E-mail: gussev@kipt.kharkov.ua*

Приведены результаты исследований различных методов обеспечения устойчивости движения частиц в сильноточных ускорителях протонов и дейтронов. На основании проведенных исследований предложена концепция создания радиационно-чистого ускорителя дейтронов на энергию 23 МэВ, способного работать в непрерывном режиме с током ~10 мА.

Одним из актуальных направлений развития электроядерной энергетики является разработка и создание нового типа энергетического реактора, использующего подсветку его дополнительными нейтронами. После того как были разработаны концепции подкритического ядерного реактора на быстрых нейтронах, работающего на торий-трансурановом топливном цикле, существенно снизились требования к интенсивности протонного пучка (12...30 мА), необходимого для создания внешнего источника нейтронов. Для создания индустрии подкритических реакторов необходимы внешние источники нейтронов с интенсивностями  $2 \dots 5 \cdot 10^{18}$  нейтр./с. Важным требованием, предъявляемым к этим источникам, является требование, чтобы способ их получения не был основан на цепной реакции деления ядер нейтронами. Перспектива создания таких источников связана с ядерными реакциями, возникающими при столкновениях быстрых протонов или дейтронов (энергия 1 ГэВ) с ядрами тяжелых элементов (*spallation*-реакции). Поэтому для создания безопасной ядерной энергетики, в которой принципиально исключены аварии, связанные с разгоном реактора, необходимы гибридные установки, включающие сильноточный ~20...30 мА ускоритель на энергию протонов ~1 ГэВ и подкритический ядерный реактор с уран-плутониевым или торий-урановым топливными циклами. Такие гибридные реакторы получили название электроядерных установок (ЭЯУ), английская аббревиатура которых *ADS* (Accelerator Driven System).

Основной проблемой разработки и создания необходимого ускорителя является снижение потерь частиц в канале ускорения до уровня, обеспечивающего безопасный радиационный фон. Эта проблема решается путем выбора соответствующих методов обеспечения устойчивости движения частиц в канале в различных диапазонах энергий. Упрощенная схема ускорителя-драйвера представлена на Рис.1. В его состав входят: инжектор (энергия 70...100 кэВ), начальная часть ускорителя (*НЧУ* – энергия ~2...3 МэВ), промежуточная часть ускорителя (*ПЧУ* – энергия ~100 МэВ) и основная часть ускорителя (*ОЧУ* – энергия ~1...1,7 ГэВ). Во всех существующих проектах ускорителей-драйверов в

качестве *НЧУ* применяется структура на основе пространственно-однородной квадрупольной фокусировки (*ПКОФ*) или (*RFQ*) в английской транскрипции, предложенная В.А. Тепляковым и И.М. Капчинским [1]. Для *ПЧУ* используются структуры с трубками дрейфа и квадрупольными линзами, размещенными внутри трубок дрейфа или вне резонаторов (*DTL*, *BCDTL*, *CCDTL* и др.).

В работе приведены результаты исследований различных методов обеспечения устойчивости дви-

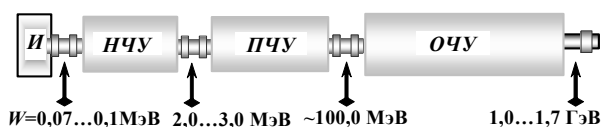


Рис. 1. Блок-схема ускорителя-драйвера

жения частиц в ускорителях протонов и дейтронов в секциях *НЧУ* и *ПЧУ*, выполненные в ИИЭНМУ на протяжении 2003-2007 гг. На основании проведенных исследований предложена концепция создания радиационно-чистого ускорителя дейтронов на энергию 23 МэВ, способного работать в непрерывном режиме с током ~10 мА. В ННЦ ХФТИ на протяжении ряда лет велись исследования по применению переменного-фазовой фокусировки для обеспечения устойчивости движения частиц в каналах линейных резонансных ускорителей. Разработана модификация этой фокусировки для ускорения интенсивных пучков, названная модифицированной переменного-фазовой фокусировкой (*МПФФ*). На основе *МПФФ* был рассчитан канал для ускорения дейтронов до энергии 40 МэВ. В качестве *НЧУ* была использована структура *RFQ* до энергии 2 МэВ. Канал с *МПФФ* состоит из четырех секций. Основные параметры ускоряющих секций приведены в таблице.

№ секции	Входная энергия, МэВ	Выходная энергия, МэВ	Длина, м	Темп ускорения, МэВ/м	Мощность возбуждения, МВт
1	2,0	6,44	3,14	1,41	0,85
2	6,44	13,99	3,78	1,89	1,45
3	13,99	30,0	6,73	2,38	2,25
4	30,0	40,4	4,11	2,52	1,45

Методом математического моделирования была исследована динамика частиц в канале. Использовалась методика крупных частиц. На Рис.2 показана зависимость потерь частиц в канале от ускоряемого тока.

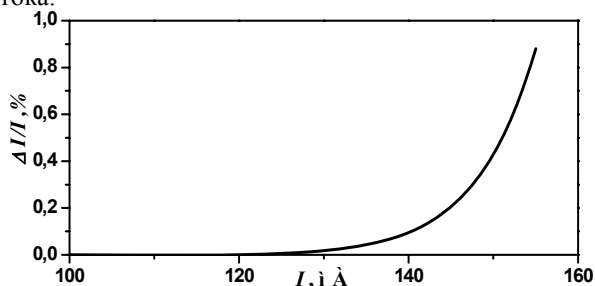


Рис.2. Зависимость потерь частиц в ускоряющем канале от величины тока на входе в секцию

Из Рис.2 следует, что до значений тока  $\sim 125$  мА потери частиц меньше 1%. Это подтверждает возможность применения МПФФ для обеспечения устойчивости движения частиц в каналах сильноточных линейных ускорителей. С целью увеличения предела интенсивности ускоряемых пучков разработчики ускорителей ведут поиск других направлений реализации НЧУ с фокусировкой знакопостоянными поперечными силами, в частности, с помощью продольного магнитного поля, создаваемого сверхпроводящими соленоидами [2,3]. Разработан проект ускорителя на энергию 1 ГэВ и средний ток  $\sim 250$  мА, в котором применяется НЧУ, где поперечная фокусировка осуществляется сверхсильным продольным магнитным полем.

Добиться снижения фокусирующего продольного поля можно, применяя для фокусировки ионов электронный пучок, удерживаемый на оси канала продольным магнитным полем. При этом для удержания мощного электронного пучка с пространственным зарядом, достаточным для фокусировки протонов, необходимы магнитные поля в 20...30 раз меньше, чем для фокусировки протонов. Такая система фокусировки вполне может быть реализована без применения сверхпроводящих соленоидов.

Впервые возможность фокусировки протонов электронным пучком рассмотрена в работе [4], а некоторые экспериментальные результаты представлены в работе [5]. Однако к настоящему времени систематические исследования возможности этого метода в применении к линейным резонансным ускорителям протонов изучены слабо.

В работе приведены результаты исследований с помощью компьютерного моделирования основных особенностей каналов формирования, группировки и ускорения протонного пучка от энергии 100 кэВ до энергии 3,0 МэВ с фокусировкой объемным зарядом электронного пучка. Амплитуда напряжения между электродами изменяется ступенями от 12,8 кВ в начале канала до 76,8 кВ в его конце. Расстояние между трубками дрейфа изменяется также ступенями от 3 до 10 мм в соответствии с изменением амплитуды высокочастотного напряжения, рабочая частота 152,5 МГц.

Так как при движении пучка в канале ускорителя одной из характеристик, определяющей возмож-

ность потерь частиц, является значение поперечного эмиттанта, при моделировании значительное внимание уделялось определению изменения (роста) эмиттанта в процессе группировки и ускорения при различной интенсивности протонного пучка. Зависимость среднеквадратичного эмиттанта пучка на выходе канала от величины тока инжекции при начальном энергетическом разбросе  $\pm 0,5\%$  показано на Рис.3. Кривая 1 соответствует эмиттансу на плоскости  $x-x'$ , кривая 2 относится к продольному эмиттансу  $z\beta_z$ .

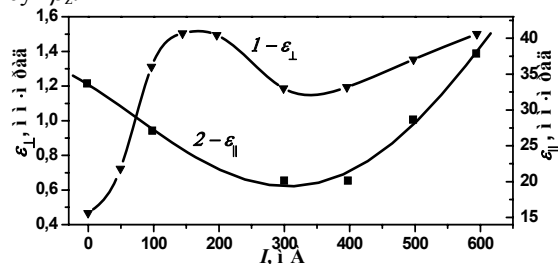


Рис.3. Изменение эмиттанта пучка на выходе канала в зависимости от тока инжекции при начальном энергетическом разбросе  $\pm 0,5\%$

Несколько неожиданным является тот факт, что обе эти кривые имеют минимум в диапазоне токов 300...400 мА. Такая зависимость поперечного и продольного эмиттанта от тока в значительной мере объясняется тем, что при токах до 200 мА при группировке пучка в нем образуются локальные уплотнения и разрежения плотности частиц. Иными словами, процесс группировки частиц при относительно небольшом начальном энергетическом разбросе в пучке сопровождается значительными нарушениями однородности распределения фазовой плотности частиц. Сильное нарушение однородности распределения плотности частиц в процессе группировки можно проследить по Рис.4,а и Рис.4,б.

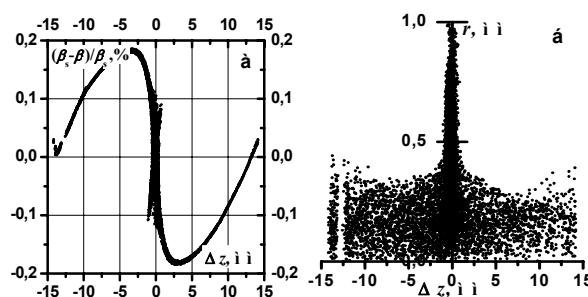


Рис.4. Характеристики пучка в 7 периоде для тока 100 мА при энергетическом разбросе  $\pm 0,5\%$ ; а — фазовый портрет пучка на продольной плоскости; б — распределение плотности частиц на плоскости  $rz$

На Рис.4,а показан фазовый портрет пучка с током 100 мА в 7-м периоде ускорения, где достигается первый продольный фокус, а на Рис.4,б показано распределение плотности частиц в плоскости  $rz$ . В этом месте пучок представляется в виде плотного диска, нанизанного на стержень со значительно меньшей плотностью.

Более детально механизм роста поперечного эмиттанта пучка вдоль канала ускорителя можно выяснить, анализируя его изменения вдоль канала и сопоставляя эти изменения с поведением внутрен-

ней потенциальной энергии, связанной с кулоновским взаимодействием частиц. На Рис.5 показана эта зависимость для тока инжекции 100 мА. Из приведенных результатов видно, что в пучке возникают релаксационные колебания плотности с широким спектром частот.

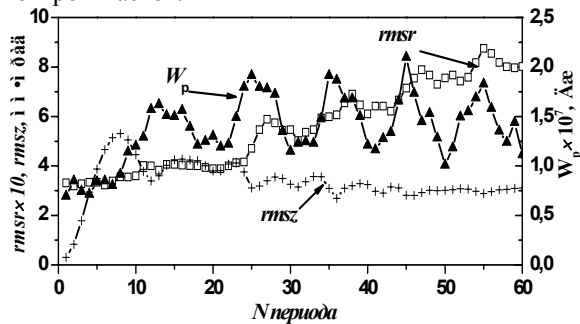


Рис.5. Изменения поперечного эмиттанта  $rmsr$ , продольного эмиттанта  $rmsz$  и внутренней потенциальной энергии  $W_p$  вдоль длины для тока 100 мА; в начале первой секции

На Рис.5 на кривой потенциальной энергии  $W_p$  в начальных периодах (до 10-го) практически отсутствуют низкочастотные колебания, так как амплитуда ВЧ- поля недостаточна для преодоления кулоновских сил расталкивания, возникающих при группировке пучка. После 10-го периода, с целью увеличения темпа ускорения пучка, амплитуда высокочастотного ускоряющего поля увеличена в 2,6 раза. Полученные результаты математического моделирования процесса движения протонного пучка через ускоритель показали, что при группировке интенсивных пучков образуются сгустки с сильно неоднородным распределением плотности частиц. Возникающая при этом неоднородность в распределении напряженности поля объемного заряда является одной из причин роста поперечного эмиттанта при формировании и ускорении интенсивных пучков. Приведенные результаты относятся к случаю ввода в ускоритель практически моноэнергетического пучка (с относительно небольшим энергетическим разбросом).

Совершенно очевидным является тот факт, что по мере роста энергетического разброса пучка на входе в ускоритель нарушения однородности распределения плотности частиц в процессе группировки и ускорения будут уменьшаться. В этом случае можно ожидать снижения роста поперечного эмиттанта вдоль ускорителя. Однако, возникает вопрос о том, как будет меняться коэффициент захвата пучка в режиме ускорения при увеличении энергетического разброса.

Для выяснения этих вопросов было проведено математическое моделирование процесса движения пучка через ускоритель для тока 100 мА с начальным энергетическим разбросом  $\pm 15\%$ . На Рис.6,а показан фазовый портрет пучка в 12 периоде для тока 100 мА при разбросе по энергиям в диапазоне  $\pm 15\%$ , а на Рис.6,б – распределение частиц в плоскости  $rz$ . Из сопоставления с результатами, приведенными на Рис.4 и Рис.6, видно, что в случае увеличения энергетического разброса нарушения однородности распределения плотности частиц значительно меньше. В этом случае фактически отсутствует продольный фокус.

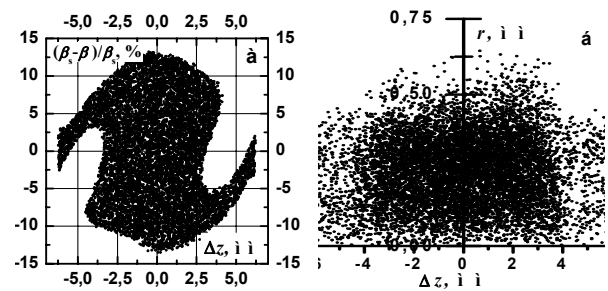


Рис.6. Характеристики пучка в 12 периоде ускорителя для тока 100 мА при энергетическом разбросе  $\pm 15\%$ ; а – фазовый портрет пучка на продольной плоскости; б – распределение плотности частиц на плоскости  $rz$

На Рис.7 показано изменение поперечного эмиттанта  $rmsr$ , продольного эмиттанта  $rmsz$  и внутренней потенциальной энергии сгустка  $W_p$  вдоль ускорителя для первых шестидесяти периодов первой секции. Из Рис.7 видно, что в начале ускорителя на кривой для внутренней потенциальной энергии  $W_p$  имеются высокочастотные колебания относительно небольшой амплитуды. На этом участке ускорителя наблюдается медленный рост как продольного, так и поперечного эмиттансов. За первые 60 периодов поперечный эмиттанс вырастает от значения 0,32 мм-мрад до значения 0,39 мм-мрад.

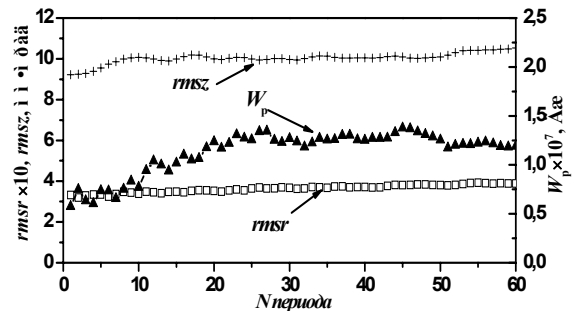


Рис.7. Изменения поперечного эмиттанта  $rmsr$ , продольного эмиттанта  $rmsz$  и внутренней потенциальной энергии  $W_p$  в начале первой секции для тока 100 мА и при энергетическом разбросе  $\pm 15\%$

Увеличение энергетического разброса пучка на входе в ускоритель незначительно снижает коэффициент захвата в режиме ускорения, который для тока 100 мА равен 98,7% при энергетическом разбросе  $\pm 15\%$ , вместо 99,5% при энергетическом разбросе  $\pm 0,5\%$ .

Из-за большего энергетического разброса начальное значение продольного эмиттанта значительно больше, чем в случае моноэнергетического пучка. Но так же, как и для моноэнергетического пучка, имеется относительно небольшой рост продольного эмиттанта в первых шести периодах ускорителя. В дальнейшем изменения как продольного, так и поперечного эмиттансов невелики. Полученные результаты показывают, что при инжекции в ускоритель моноэнергетических пучков в процессе их продольной группировки в пучках происходит сильное нарушение однородности распределения плотности частиц, что вызывает возникновение релаксационных колебаний, приводящих к значительному росту поперечного эмиттанта. Увеличение начального энергетического разброса снижает ам-

плитуды релаксационных колебаний плотности и снижает темп роста поперечного эмиттанта. Для снижения роста поперечного эмиттанта с целью снижения вероятных потерь частиц в канале ускорителя при ускорении интенсивных ионных пучков необходимо тщательное согласование продольных характеристик инжектируемого пучка с продольным акцептансом начальной части ускорителя.

При ускорении пучков с токами до 50 мА в случае, когда в качестве ускоряющих секций используются резонаторы с аксиально-симметричной структурой полей, обеспечивающих ускорение и радиальную устойчивость частиц, для создания НЧУ может быть использована конструкция, состоящая из группирователя-согласователя, основанного на суперпозиции электростатического и высокочастотного полей, и ускоряющей секции на основе Н-резонатора с МПФФ. Такое устройство при энергии инжекции 70...100 кэВ/нуклон может обеспечивать ускорение ионов до энергии 2...4 МэВ/нуклон с темпом ускорения 2...3 МэВ/м и коэффициентом захвата частиц 0,7...0,8 при токе ионов на выходе НЧУ до 40...50 мА и обеспечивать оптимальные параметры пучка для следующих ускоряющих секций. На таком принципе был рассчитан канал линейного ускорителя дейтронов на энергию 23 МэВ, способного работать в непрерывном режиме с токами порядка 10 мА. Канал состоит из группирующего устройства и тринадцати секций на основе МПФФ и согласующих линз между ними. Секционирование канала позволяет проводить согласование секций как по поперечному, так и продольному движению.

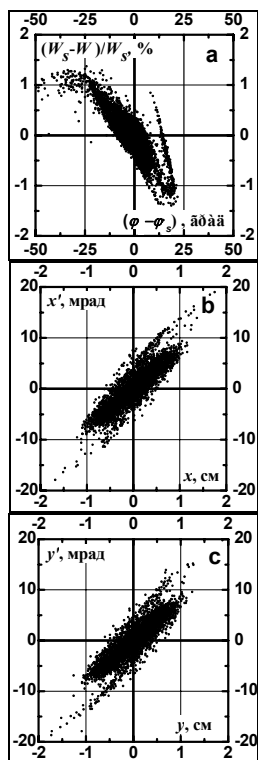


Рис.8. Проекция фазового объёма пучка на выходе секции №10: **a** – на продольную плоскость; **b** – на плоскость  $x x'$ ; **c** – на плоскость  $y y'$

Принципы согласования ясны из Рис.8 и Рис.9, где показаны фазовые портреты пучка на выходе одной из секций и после расположенной за ней лин-

зой. Хорошее согласование секций обеспечивает малые потери частиц в канале, что позволяет говорить о радиационно чистом ускорителе. Кроме того, такая структура канала позволяет осуществить переход без потерь частиц на удвоенную частоту уже после энергии 23 МэВ. Секционирование канала открывает возможности плавной регулировки энергии в линейных ускорителях путем выключения секций и перевода последней не выключенной секции в специальный режим работы. На Рис.10 показаны энергетические спектры пучка на выходе предпоследней секции, когда последняя выключена, также на выходе последней при различных режимах её работы. Эти результаты показывают возможность плавного перекрытия спектра между двумя секциями.

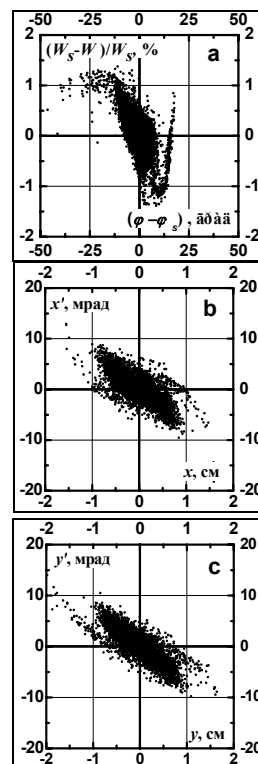


Рис.9. Проекция фазового объёма пучка после квадратного триплета: **a** – на продольную плоскость; **b** – на плоскость  $x x'$ ; **c** – на плоскость  $y y'$

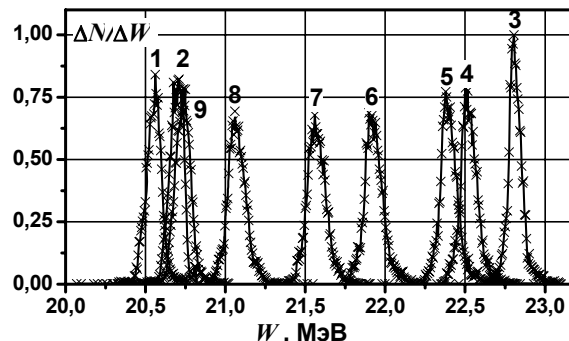


Рис.10. Энергетический спектр: – выход секции №12: 1)  $E/E_n=1,0$ ,  $\Delta\varphi=0^\circ$  (номинальный режим); 2)  $E/E_n=1,0$ ,  $\Delta\varphi=15^\circ$ ; – выход секции №13: 3)  $E/E_n=1,0$ ,  $\Delta\varphi=0^\circ$  (номинальный режим); 4)  $E/E_n=0,61$ ,  $\Delta\varphi=0^\circ$ ; 5)  $E/E_n=0,61$ ,  $\Delta\varphi=-10^\circ$ ; 6)  $E/E_n=0,51$ ,  $\Delta\varphi=-30^\circ$ ; 7)  $E/E_n=0,36$ ,  $\Delta\varphi=-30^\circ$ ; 8)  $E/E_n=0,28$ ,  $\Delta\varphi=-6,0^\circ$ ; 9)  $E/E_n=0,61$ ,  $\Delta\varphi=-60,0^\circ$

Такой подход может быть реализован и при разработке, как начальной части ускорителя, так и части ускорителя промежуточных энергий с возможностью четырехкратного перекрытия частот. При этом в качестве *НЧУ* может применяться как структура RFQ, так и структура на основе суперпозиции электростатического и высокочастотного полей.

### **ВЫВОДЫ**

1. Проведенными исследованиями показано, что комбинации методов высокочастотной квадрупольной, модифицированной переменного-фазовой и статической магнитной аксиально-симметричной или квадрупольной фокусировки позволяют вести разработки каналов линейных резонансных сильноточных ускорителей ионов с минимальными радиационными потерями ускоряемых частиц.

2. Исследован новый тип начальной части сильноточных линейных резонансных ускорителей, в котором устойчивость движения ускоряемых ионов достигается фокусировкой объемным зарядом электронного пучка, инжектируемого в ускоряющую секцию и удерживаемого продольным магнитным полем. Показано, что такая начальная часть является перспективной для формирования и ускорения пучков протонов в диапазоне токов 300...600 мА.

3. Исследованы механизмы роста поперечного и продольного эмиттансов в процессе группировки и

ускорения протонных пучков в диапазоне токов от 100 до 600 мА. Показано, что при инжекции в такой канал моноэнергетичного пучка в процессе продольной фокусировки происходит сильное нарушение однородности распределения плотности частиц по объему пучка. Это приводит к возникновению в ускоряемых пучках колебания плотности под влиянием кулоновских сил с широким спектром частот, приводящих к росту как поперечного, так и продольного эмиттансов.

### **ЛИТЕРАТУРА**

1. И.М. Капчинский, В.А. Тепляков // *ПТЭ*. 1970, №2, с.19-21.
2. Б.И. Бондарев, А.А. Кузьмин, Б.П. Мурин и др. // *Труды VI Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц*. Дубна, 1979, т.1, с.260-263.
3. Г.И. Бацких, Б.П. Мурин, И.В. Чувило и др. // *Совещание по ускорителям заряженных частиц*. Протвино, 1999, т.1, с.203-211.
4. А.И. Ахиезер, Г.Я. Любарский, Я.Б. Файнберг // *Теория и расчет линейных ускорителей*. М.: «Госатомиздат», 1962, с.131-146.
5. Н.И. Абраменко, Н.М. Гаврилов, Е.В. Громов и др. // *ВАНТ*. 1985, вып.2(23), с.48-50.

### **DEVELOPMENT OF A CONCEPT OF RADIATION-SAFE HIGH-CURRENT PROTON AND DEUTERON ACCELERATORS FOR ELECTRONUCLEAR APPLICATIONS**

*Ye.V. Gussev, P.O. Demchenko, A.M. Yegorov, B.I. Ivanov, V.G. Papkovich, N.G. Schulika*

The article presents research results of various methods for particle-movement stability in proton and deuteron high-current accelerators. Based on the results obtained, a concept of a radiation-safe deuteron accelerator with output energy 23 MeV operating in a continuous mode at the average current of 10 mA is built.

### **РОЗРОБКА КОНЦЕПЦІЇ СТВОРЕННЯ СИЛЬНОСТРУМОВИХ РАДІАЦІЙНО-БЕЗПЕЧНИХ ПРИСКОРЮВАЧІВ ПРОТОНІВ ТА ДЕЙТРОНІВ ДЛЯ ЕЛЕКТРОЯДЕРНИХ ТЕХНОЛОГІЙ**

*Є.В. Гусєв, П.О. Демченко, О.М. Єгоров, Б.І. Іванов, В.Г. Папкович, М.Г. Шуліка*

Наведено результати досліджень різних методів забезпечення стійкості руху часток у сильноточних прискорювачах протонів та дейтронів. На основі проведених досліджень запропоновано концепцію створення радіаційно-безпечного прискорювача дейтронів на енергію 23 МеВ, що здатний працювати у безперервному режимі зі струмом ~10 мА.