

УСКОРЯЮЩИЙ КАНАЛ НАЧАЛЬНОЙ ЧАСТИ ЛИНЕЙНОГО УСКОРИТЕЛЯ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ С КОМБИНИРОВАННОЙ ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ ФОКУСИРОВКОЙ

С.С. Тишкин

Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»,
Харьков, Украина

E-mail: tishkin@kipt.kharkov.ua

Описан канал для ускорения тяжелых ионов с отношением массового числа к зарядовому $A/Q=15$. Устойчивость движения частиц в канале обеспечивается с помощью комбинации высокочастотной квадрупольной и переменного-фазовой фокусировок. Предложена схема реализации ускоряюще-фокусирующего тракта на базе И-структуры.

1. ВВЕДЕНИЕ

Одной из важных задач, которую необходимо решать в Украине, является «научно-техническое обоснование возможности продления срока эксплуатации атомных блоков» [1] в связи с завершением их проектного ресурса. Поведение конструкционных материалов элементов АЭС в активной зоне атомных реакторов определяет степень безопасности и экономическую эффективность эксплуатируемых энергоблоков. Так как пластические характеристики конструкционных материалов во многом определяют работоспособность конструкций АЭС, то, используя ускоренные заряженные частицы, можно полностью моделировать процессы, происходящие при радиационном воздействии в стационарных и переходных режимах эксплуатации. Кроме того, интерес к изучению процессов при прохождении ионов в материалах обусловлен особенностями радиационных изменений, что имеет большое значение для использования радиационных эффектов в развитии новых технологий. Уровень радиационного повреждения конструкционных материалов при стандартных параметрах работы АЭС составляет $10^{-7} \dots 10^{-11}$ сна. При использовании тяжелых ионов для имитации повреждаемости, этот параметр составляет $10^{-3} \dots 10^{-4}$ сна, что позволяет значительно сократить экспериментальные работы в области радиационного материаловедения. В связи этим в ННЦ ХФТИ для линейного ускорителя многозарядных ионов (ЛУМЗИ) возникла необходимость разработать ускоряюще-фокусирующий тракт начальной части ускорителя (НЧУ) со следующими параметрами: энергия инжекции 500 кэВ, импульсный ток ≥ 5 мА, отношение массового числа к зарядовому (A/Q) = 15. Это позволит ускорять ионы азота, алюминия, кальция, никеля, кобальта, железа и т.д.

В настоящее время в качестве НЧУ широко применение получила ускоряющая структура с пространственно-однородной квадрупольной фокусировкой [2] (ПОКФ или RFQ в зарубежном обозначении). Структуры с RFQ обеспечивают 95%-захват заряженных частиц в режим ускорения, их фокусировку и ускорение. Однако темп ускорения таких ускорителей не превышает 0,6...0,8 МэВ/м. В

рассматриваемом случае длина такой структуры будет слишком велика. В данной работе предлагается использовать ускоряющую структуру с комбинированной высокочастотной фокусировкой (КВЧФ), которая позволит выдержать все входные параметры для основной секции ЛУМЗИ с необходимыми геометрическими размерами.

2. КОМБИНИРОВАННАЯ ВЫСОКОЧАСТОТНАЯ ФОКУСИРОВКА В ЛИНЕЙНЫХ УСКОРИТЕЛЯХ ИОНОВ

КВЧФ является дальнейшим развитием идеи переменного-фазовой фокусировки (ПФФ) [3,4], в которой знакопеременная модуляция ВЧ-поля производится по всем трем пространственным координатам. Реализовать такой тип фокусировки можно на базе модифицированной переменного-фазовой фокусировки (МПФФ) [5], включив в фокусирующий период высокочастотные квадрупольные [6]. На Рис.1 представлен участок И-структуры, содержащий один ускоряюще-фокусирующий период с КВЧФ.

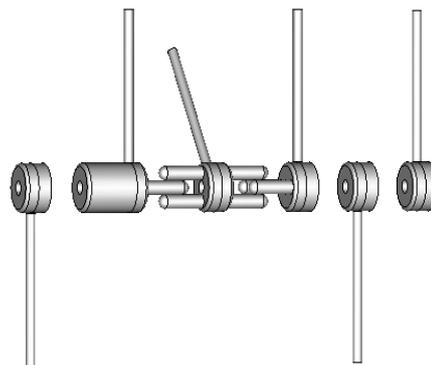


Рис.1. Участок И-структуры, содержащий фокусирующий период КВЧФ

Идея комбинации МПФФ и ВЧ-квадрупольной фокусировки заключается в следующем. В МПФФ для создания устойчивого движения используется один единственный механизм – осесимметричное ВЧ-поле. При этом обеспечить радиальную устойчивость движения сгустка заряженных частиц возможно лишь за счет ослабления продольной устойчивости и наоборот. Такая жесткая связь между устойчивостью продольного и поперечного движения сильно ограничивает величины предельно ускоре-

мых токов в случае ПФФ. Ослабить такую связь можно, используя структуру ускоряюще-фокусирующего периода МПФФ с включением дополнительного механизма обеспечения радиальной устойчивости движения пучка заряженных частиц в виде ВЧ-квадрупольного поля. В этом случае устойчивость радиального и поперечного движения сгустка заряженных частиц можно обеспечить независимо друг от друга. Это позволяет строить ускоряюще-фокусирующие каналы линейных ускорителей ионов с чисто ВЧ-фокусировкой, которые не уступают классическим ускорителям, использующих внешние фокусирующие устройства.

3. МЕТОД РАСЧЕТА УСКОРЯЮЩЕ-ФОКУСИРУЮЩЕГО ТРАКТА ЛИНЕЙНОГО УСКОРИТЕЛЯ ИОНОВ С ФОКУСИРОВКОЙ ВЫСОКОЧАСТОТНЫМ ПОЛЕМ

Разобьем весь ускоряюще-фокусирующий канал ускорителя на отдельные периоды фокусировки. Структура каждого такого периода, в зависимости от энергии ускоряемых ионов, с учетом продольной и радиальной устойчивости движения частиц определяется с помощью разработанной автором программы APFRFQ0. Обычно для определения устойчивости радиального движения частиц в ускорителях с магнитными квадрупольными линзами достаточно использовать диаграмму Глюкстерна-Смита [7], которая позволяет определить набег фазы радиальных колебаний для частиц, близких к равновесной. В ускорителях с фокусировкой высокочастотным полем фокусирующе-дефокусирующие силы являются функциями фазы пролета неравновесными частицами фокусирующего периода, которая, в свою очередь, связана с существенно нелинейными продольными колебаниями самих частиц. В этом случае использование диаграммы устойчивости не позволяет определить, каков допустимый размах фазовых колебаний при сохранении радиальной устойчивости.

В отличие от диаграммы Глюкстерна-Смита в данной программе используется метод, который позволяет определить набег фазы радиальных колебаний не только для синхронной частицы одного фокусирующего периода, но и для всех неравновесных частиц с учетом их фазового движения. Кроме того, имеется возможность провести подобный анализ для любой группы фокусирующих периодов, включая всю ускоряющую структуру в целом, снимая требования к строгой периодичности ускоряюще-фокусирующего канала, присутствующие при построении диаграммы Глюкстерна-Смита. Последнее обстоятельство важно с практической точки зрения, так как всегда ускоряюще-фокусирующий канал состоит из фокусирующих периодов с различными фокусирующими свойствами и не может рассматриваться как строго периодическая структура.

Суть разработанного метода заключается в следующем. Пусть пучок с ненулевым зарядом проходит через фокусирующий период. Требуется определить устойчивость радиального движения

неравновесных частиц в полях, созданных реальной конфигурацией трубок дрейфа, объемным зарядом пучка, с учетом связи радиального и поперечного движения. Значение координаты и скорости радиального движения для каждой такой частицы на входе и на выходе фокусирующего периода связаны между собой матрицей фокусирующего периода [8]:

$$\begin{pmatrix} r \\ V_r \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r_0 \\ V_{r_0} \end{pmatrix}.$$

Условием устойчивости является

$$\cos \mu = \left| \frac{T_{11} + T_{22}}{2} \right| < 1,$$

где μ – набег фазы Флоке на одном фокусирующем периоде.

Элементы матрицы $\|T\|$ в общем случае зависят от геометрических размеров структуры, электрического поля в зазорах, скорости ионов, объемного заряда сгустка и начальных условий влета частицы в фокусирующий период. Т.е., строго говоря, для каждой частицы пучка существует своя «локальная» матрица фокусирующего периода, коэффициенты которой полностью определяют характер движения этой частицы. Задача непосредственного определения коэффициентов «локальных» матриц фокусирующего периода в реальном случае не является тривиальной. Однако их можно определить, используя тот факт, что матрица фокусирующего периода определена, если известны два линейно независимые решения для фокусирующего периода. Для нахождения коэффициентов «локальных» матриц фокусирующего периода используем следующий прием. Синхронно с входением сгустка в фокусирующий период через малые промежутки времени (в данной реализации в фазовых координатах через каждый градус) будем инжектировать в начало фокусирующего периода по две «пилотные» частицы в приосевой области с начальными условиями:

$$r_0 = 0; V_{r_0} \neq 0; r_0 \neq 0; V_{r_0} = 0.$$

Затем интегрируем уравнения движения численными методами на периоде фокусировки в суммарном поле, создаваемом объемным зарядом сгустка и трубками дрейфа, при этом автоматически учитывается связь продольного и поперечного движения. Получив значение r и V_r на выходе фокусирующего периода, находим для неравновесных частиц:

$$T_{11} = \frac{r}{r_0}, T_{22} = \frac{V_r}{V_{r_0}}.$$

Анализ движения неравновесных частиц позволяет определить набор синхронных фаз, коэффициентов зазоров, амплитуд ВЧ-поля и квадрупольных градиентов в ускоряющих зазорах, при которых можно свести к минимуму зависимость набег фаз неравновесных частиц от фазы пролета фокусирующего периода, что является одним из условий не возрастания эмиттанса согласованного с каналом пучка. На Рис.2 представлена характерная для КВЧФ зависимость набег фазы радиальных колебаний с

учетом их фазового движения после нескольких периодов фокусировки от фазы инжекции в ускоряющую структуру.

Значения коэффициентов матрицы фокусирующего периода $\|T\|$ для синхронной частицы можно использовать для построения согласованных между собой фокусирующих периодов с различными фокусирующими свойствами [9].

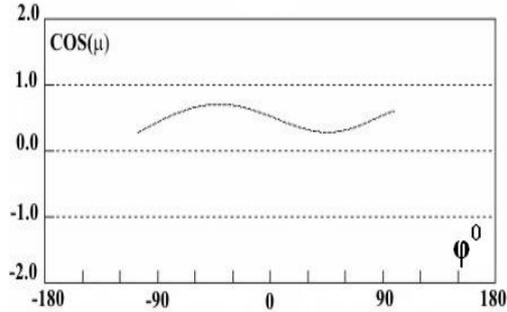


Рис.2. Набег фазы радиальных колебаний неравновесных частиц в зависимости от фазы влета в ускоряющую структуру

Программа APFRFQ0 является составной частью интегрированной среды разработки сильноточных линейных ускорителей ионов с фокусировкой ВЧ-полем APFRFQ. Данная среда разработки имеет встроенную подпрограмму интегрирования уравнений движения, визуализации динамики частиц, расчета выходных характеристик пучка и программу коррекции геометрии структуры. Расчет влияния кулоновских сил производится методом крупных частиц с использованием двух моделей расчета. Для осесимметричных задач используются модели частица – сетка (PM) и частица-частица (PP), для трехмерных задач – модель PP [10]. Для расчета полей в реальных структурах используется метод вычисления полей, основанный на одном из вариантов метода интегральных уравнений – методе вспомогательных зарядов (МВЗ) [11]. Согласно этому методу потенциал квазиэлектростатического поля представлен в виде суперпозиции полей точечных зарядов, расположенных вне рассматриваемой области. Величины N зарядов находятся из граничных условий в N точках поверхности электродов. Задание величины зарядов внутри электродов эквивалентно использованию определенной плотности заряда на поверхности электродов. МВЗ по сравнению с сеточными методами обладает следующими преимуществами.

1. В случае присутствия открытых границ не требуется их искусственного замыкания. В методе МВЗ открытые граничные условия выполняются автоматически.

2. Решение ищется только в той области, где это необходимо. В частности, при расчете динамики пучка необходимо знать распределение электрического поля в области взаимодействия его с пучком заряженных частиц, т.е. только в приосевой области.

3. Высокая точность решения, в том числе и на поверхности электродов.

4. Простота программной реализации.

В данной реализации программа RFQFLD позволяет сделать расчет квазиэлектростатических

полей для осесимметричных ускоряющих зазоров и для зазоров с квадрупольной симметрией с учетом их реальной геометрии. На Рис.3 представлено распределение потенциала поля в сечении квадрупольного зазора, совпадающего с одной из плоскостей квадрупольной симметрии. Черные точки – вспомогательные заряды, белые кружки – точки наблюдения, расположенные на поверхности электродов.

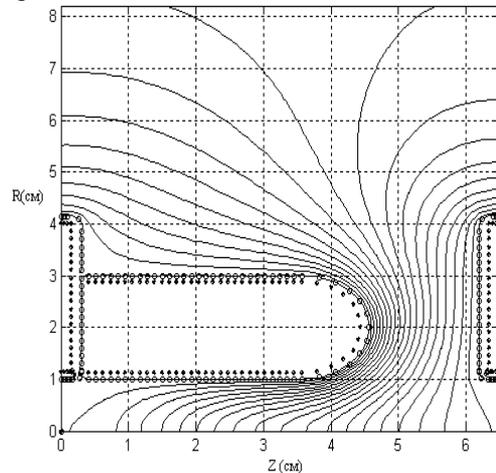


Рис.3. Расчет трехмерных квазиэлектростатических полей в ускоряющих зазорах методом вспомогательных зарядов

Рассмотрим вопрос согласования сильноточного пучка с протяженным ускоряюще-фокусирующим каналом ускорителя. В общей постановке данная задача является довольно сложной, поэтому для её решения прибегают к различного рода упрощениям. В частности, пучок называется согласованным, если начальные условия для пучка на входе ЛУ таковы, что на протяжении фокусирующего канала огибающая пучка постоянна или является периодической функцией. Следуя этому определению, начальные условия для согласованного пучка можно найти, используя один фокусирующий период. Однако такой подход не вполне корректен и может приводить к значительным ошибкам. Во-первых, не учитывается продольное движение неравновесных частиц, во-вторых, предполагается периодичность ускоряющего канала и, в-третьих, для существования периодического решения для огибающей пучка требуется специальная функция распределения частиц в шестимерном фазовом пространстве. Сформулируем задачу согласования сильноточного пучка с протяженным фокусирующим каналом линейного ускорителя в наиболее общем виде. Будем считать, что пучок согласован с каналом, если в процессе ускорения рост его эмиттанса минимальный при максимальном токопрохождении. Такое определение учитывает всю динамику в произвольной ускоряющей структуре с учетом нелинейности высокочастотных и кулоновских полей, причем на функцию распределения частиц в фазовом пространстве не накладывается никаких ограничений. Метод решения подобных задач описан в работе [12]. Для рассматриваемого случая автором разработана программа RFQOPT. Данная программа позволяет определять оптимальные входные поперечные Twiss параметры пучка, при

которых рост эмиттанса на выходе ускоряющей структуры минимален при максимальной трансмиссии пучка, для различных значений входных токов.

4. ОСНОВНЫЕ РАСЧЕТНЫЕ ПАРАМЕТРЫ УСКОРЯЮЩЕ-ФОКУСИРУЮЩЕГО ТРАКТА НЧУ С КВЧФ

Расчет параметров ускоряюще-фокусирующего тракта НЧУ и моделирование динамики частиц проводились в среде разработки APFRFQ. Для учета сил объемного заряда использовался метод крупных частиц РР (частица – частица). Начальное число частиц, используемое при численном моделировании динамики частиц, равно 7200. На Рис.4 представлены основные входные параметры пучка: поперечные эмиттансы, проекция геометрических размеров пучка на плоскость XY и фазовый портрет пучка.

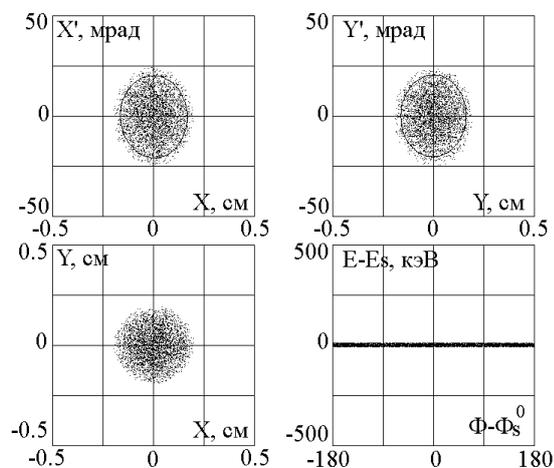


Рис.4. Входные параметры пучка

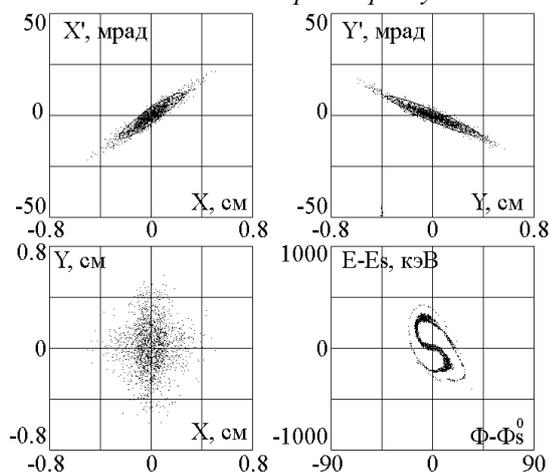


Рис.5. Выходные параметры пучка

На Рис.5 представлены выходные параметры. Основные характеристики ускоряюще-фокусирующего тракта НЧУ приведены в табл.1, в табл.2 – параметры ускоряемого пучка. В табл.2 используются следующие обозначения: ϵ (rms) – нормализованный среднеквадратичный эмиттанс; ϵ (100%) – нормализованный эмиттанс, включающий 100% частиц пучка; ϵ (99%) – нормализованный эмиттанс, включающий 99% частиц пучка.

Рассмотрим особенности построения данного ускоряюще-фокусирующего тракта. Ускоряющий канал состоит из ускоряюще-группирующего участка

и основного. Задача первого участка заключается в том, чтобы при максимальном коэффициенте захвата частиц в режим ускорения создать из непрерывного пучка сгусток частиц максимально сжатого по фазе, при минимальном росте эмиттанса пучка. При этом возникает следующая трудность. В структурах с пространственно-однородной квадрупольной фокусирующей силой, как следует из названия, фокусирующие силы, действующие на частицу, не зависят от их фазы. Этот факт позволяет в момент формирования из непрерывного пучка сгустка заряженных частиц фокусировать все 360° пучка. При фокусировке неоднородными ВЧ-квадрупольями (зазор с «рогами») эффективная фокусировка возможна лишь для частиц с фазой пролета ускоряющего периода, близкой к нулю.

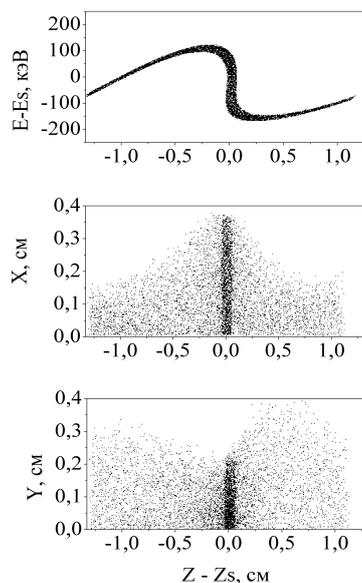


Рис.6. Фазовый портрет и поперечные профили пучка в момент прохождения первого квадрупольного дуплета

В рассматриваемом канале эта проблема решается за счет фазового движения. Структура группирующего участка рассчитана таким образом, что в момент прохождения середины квадрупольного дуплета сгусток частиц максимально сжат по фазе. На Рис.6 представлен фазовый портрет и профили пучка в плоскостях X и Y в момент прохождения первого квадрупольного дуплета. Как видно из графика, частицы пучка, захваченные в режим ускорения, сосредоточены в узком диапазоне фаз вблизи синхронной частицы и эффективно взаимодействуют с полем ВЧ-квадруполья. Такое построение ускоряющего канала позволяет обеспечить радиальную устойчивость частиц с углом захвата более 180° при высоком темпе ускорения и незначительном росте эмиттанса пучка. Реализовать данный тип фокусировки возможно используя И-структуру. При этом нужно отметить следующее обстоятельство. Создание квадрупольных компонент поля осуществляется за счет введения в ускоряющий зазор дополнительных электродов («рогов»), что значительно снижает электрическую прочность такого зазора. Поэтому разность потенциалов между электродами в квадрупольном зазоре должна быть значительно меньше, чем в осесимметричном.

Причем с ростом энергии частиц это различие возрастает. Возникает необходимость плавной регулировки отношения разности потенциалов между электродами в осесимметричных и квадрупольных зазорах вдоль ускоряющей структуры.

Для ИН-структуры осуществить такую регулировку можно азимутальным вращением штанги, на которой крепится центральная трубка дрейфа квадрупольного участка фокусировки (см. Рис.1). Величина угла вращения будет определять разность напряжений в соседних осесимметричных и квадрупольных зазорах.

Таблица 1. Основные параметры ускоряюще-фокусирующего тракта НЧУ с КВЧФ

Рабочая частота	47.2 МГц
Длина канала	642 см
Число ускоряющих зазоров	78
Апертура (радиус) канала	0,4...0,7 см
Структура фокусирующего периода	ОДФОО
Распределение фаз синхронных частиц на основном фокусирующем периоде	$-70^0, 0^0, 0^0, 0^0, -40^0$
Максимальная напряженность поля на поверхности электродов	185 кВ/см

Таблица 2. Расчетные параметры пучка

Энергия инжекции	33 кэВ/н
Выходная энергия	1 МэВ/н
Ток инжекции	10 мА
Ускоренный ток	5,2 мА
Входные поперечные эмиттансы пучка	
ϵ_x (rms)	0,071 мм·мрад
ϵ_y (rms)	0,070 мм·мрад
ϵ_x (100%)	0,432 мм·мрад
ϵ_y (100%)	0,424 мм·мрад
Выходные эмиттансы пучка	
ϵ_x (rms)	0,119 мм·мрад
ϵ_y (rms)	0,114 мм·мрад
$\epsilon_{\text{я}}$ (rms)	1574 град·кэВ
ϵ_x (99%)	1,207 мм·мрад
ϵ_y (99%)	1,119 мм·мрад
ϵ_z (99%)	10029 град·кэВ

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассчитанный ускоряюще-фокусирующий тракт начальной части линейного ускорителя тяжелых ионов с комбинированной фокусировкой ВЧ-полем, обладая исключительной конструктивной простотой, позволяет ускорять ионные пучки с импульсным током 5 мА, коэффициентом захвата ~50% и средним темпом ускорения ~ 2.3 МэВ/м. Это

ACCELERATING CHANNEL FOR INITIAL SECTION OF HEAVY ION LINEAR ACCELERATOR WITH COMBINED HIGH-FREQUENCY FOCUSING

S.S. Tishkin

The channel for accelerating heavy ions with mass-to-charge ration of $A/Q=15$ is discussed. Stability of the particle motion in the channel is provided by integrated quadrupole high-frequency and alternating phase focusing. A principle for alternating and focusing is realized on the basis of ИН-structure.

ПРИСКОРЮЮЧИЙ КАНАЛ ПОЧАТКОВОЇ ЧАСТИНИ ЛІНІЙНОГО ПРИСКОРЮВАЧА ВАЖКИХ ІОНІВ З КОМБІНОВАНИМ ВИСОКОЧАСТОТНИМ ФОКУСУВАННЯМ

S.S. Tishkin

Описано канал для прискорення важких іонів з відношенням масового числа до зарядового $A/Q=15$. Стійкість руху частинок в каналі забезпечується за допомогою комбінації високочастотного квадрупольного і змінно-фазового фокусування. Запропонована схема реалізації прискорююче-фокусуєного тракту на базі ІН-структури.

позволит ускорять ионы азота, алюминия, кальция, никеля, кобальта, железа и т.д. для имитации повреждаемости конструкционных материалов, используемых в элементах конструкций АЭС.

ЛИТЕРАТУРА

- И.М. Неклюдов. Состояние и проблемы атомной энергетики в Украине // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение»* (90). 2007, №2, с.3-9.
- Авт. свидетельство СССР № 265312. Линейный ускоритель ионов / В.В. Владимирский, И.М. Капчинский, В.А. Тепляков // *Бюл. ОИПТЗ*. 1970, №10, с.75.
- M.L. Good. Phase-Reversal focusing in Linear Accelerators // *Phys.Rev.* 1953, №2, 538-541.
- Я.Б. Файнберг. Переменно-фазовая фокусировка в линейных ускорителях // *ЖТФ*. 1959, т.29, в.5, с.568-569.
- В.Г. Папкович, Н.А. Хижняк, Н.Г. Шулика. Переменно-фазовая фокусировка в линейном ускорителе // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Техника физ. эксперимента»* (2). 1978, в.2, с.51-56.
- В.А. Бомко, З.Е. Птухина, С.С. Тишкин, Н.Г. Шулика. Вариант фокусировки ускоряющим ВЧ-полем в линейных ускорителях ионов // *Сборник докладов XVIII Конференции по ускорителям заряженных частиц RUPAC-2002*, т.1. Обнинск, 2004, с.227-230.
- L. Smith, R.G. Glukstern. Focusing in linear ion accelerators // *Rev. Scient. Instr.* 1955, v.26, p.220-228.
- И.М. Капчинский. *Теория линейных резонансных ускорителей*. М.: «Энергоиздат», 1982.
- А.Н. Коростелев, Н.С. Репалов, Н.А. Хижняк. *Нелинейная теория движения сгустка заряженных частиц в высокочастотных и ускоряющих полях*: Препринт ХФТИ 90-11, с.1-12.
- S.S. Tishkin. The numerical field calculation in structure with RFQ with the method of the auxiliary charges // *Problems of Atomic Science and Technology. Series «Nuclear Physics Investigations»*. 2003, №1, p.121-123.
- Р. Хокни, Дж. Иствуд. *Численное моделирование методом частиц*. М. «МИР», 1987.
- W. Barth, V.O. Bomko, I. Dalh, et al. Metod for minimization of the beam phase volume growth on the post-stripping section of the UNILAC // *Problems of Atomic Science and Technology. Series «Nuclear Physics Investigations»*. 2007, №5, p.171-174.

Статья поступила в редакцию 07.05.2008 г.