УДК 533.9

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИЛЬНОТОЧНОГО ИОННОГО ЛИНЕЙНОГО ИНДУКЦИОННОГО УСКОРИТЕЛЯ С ИНЖЕКЦИЕЙ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ ПУЧКОВ

***О.В. Богдан, В.И. Карась, Е.А. Корнилов, О.В. Мануйленко*[1]**
Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт», Харьков, Украина
[1]E-mail: ovm@kipt.kharkov.ua

Представлены результаты 2d3v-численного моделирования методом макрочастиц транспортировки и ускорения сильноточного трубчатого ионного пучка в шести магнитоизолированных промежутках. Зарядовая и токовая компенсации осуществляются сопровождающим электронным пучком, а также дополнительно инжектируемыми электронными пучками. Ускоряющее электрическое поле приложено к первому, третьему и пятому каспам. Его величина такова, что начальная кинетическая энергия компенсирующих электронных пучков немного выше потенциального барьера ускоряющего поля в каждом каспе, что позволяет электронному пучку преодолеть ускоряющий потенциал в одном каспе. Второй, четвертый и шестой каспы, в которых ускоряющее поле отсутствует, используются для инжекции дополнительных компенсирующих электронных пучков, которые заменяют "отработавший" на предыдущем ускорительном промежутке электронный пучок. При моделировании численно решались полные уравнения Максвелла и релятивистские уравнения движения заряженных частиц. Для вычисления плотностей тока на сетке использована сохраняющая заряд схема. Продемонстрирована возможность транспортировки и ускорения сильноточного трубчатого ионного пучка в шести каспах. Показано, что функция распределения сильноточного ионного пучка на выходе ускорителя существенно улучшается благодаря оптимизации параметров инжектируемых дополнительных электронных пучков.

1. ВВЕДЕНИЕ

Одним из перспективных методов получения сильноточного ионного пучка (СИП) для инерциального термоядерного синтеза (ИТС) является использование линейных индукционных ускорителей (ЛИУ). Вакуумные варианты ЛИУ рассмотрены в [1-3]. При этом одновременно ускоряются от 16 до 120 пучков ионов, поперечная фокусировка которых осуществляется квадрупольными линзами. С ростом энергии число ускоряемых пучков уменьшается за счет сведения нескольких ионных пучков в один. Конечная энергия ионов должна достигать величины 10 ГэВ с энергосодержанием порядка 10 МДж при длительности импульса в несколько десятков наносекунд. Достоинствами такого подхода, по сравнению с использованием линейных резонансных ускорителей, является то, что ЛИУ может работать при большой частоте импульсов, ускорять с высоким КПД (более 30%, [3]), сильноточные пучки практически любых ионов, а также просто и естественно осуществлять временное сжатие токового импульса в процессе ускорения, что позволяет устранить операции, связанные со значительным (на несколько порядков величины) увеличением его тока за счет компрессионных колец.

Альтернативой вакуумным вариантам ЛИУ является ускоритель, в котором используются коллективные методы фокусировки. В таком ЛИУ силы пространственного заряда ионного пучка скомпенсированы электронами [2,4,5], а электронный ток подавлен магнитной изоляцией ускоряющих промежутков [6]. Ускоряемый ток ионов в таком ЛИУ, при обеспечении зарядовой и токовой компенсаций СИП в магнитоизолированном ускоряющем зазоре, может составлять десятки килоампер, что позволяет, для проблемы ИТС, понизить конечную энергию ионов до нескольких сотен мегаэлектронвольт при сохранении требуемого энергосодержания пучков на мишени [2]. При этом отпадает необходимость в сооружении накопительных комплексов и в многоступенчатом сжатии токового импульса ионов. Так как такой ускоритель является аксиально-симметричным, то известный механизм транспортировки компенсированного ионного пучка (КИП) через магнитный барьер [7] не реализуется, так как не может возникнуть азимутальное поляризационное электрическое поле. Механизм зарядовой и токовой компенсаций СИП с помощью электронного пучка в осесимметричном ускоряющем промежутке исследован в [6,8-10], где изучены динамика электронов и ионов в магнитном поле касповой геометрии при наличии постоянного внешнего ускоряющего поля в одночастичном приближении, а также влияние собственных электрических и магнитных полей электронного и ионного пучков на магнитную изоляцию и их прохождения через касп. В [11, 12] продемонстрирована возможность транспортировки и ускорения КИП в пяти каспах, показано, что функция распределения СИП на выходе ускорителя улучшается с ростом энергии сопровождающего компенсирующего электронного пучка, а также показано, что инжекция дополнительных сильноточных электронных пучков в каспы приводит к увеличению моноэнергетичности ускоряемого СИП и к уменьшению его расходимости. В [13] показано, что при небольшом темпе ускорения, когда кинетическая энергия компенсирующего электронного пучка больше потенциального барьера ускоряющего поля, качество функции распределения СИП на выходе

PROBLEMS OF ATOMIC SCIENCE AND TECHNOLOGY. 2010. № 2.
Series: Nuclear Physics Investigations (53), p.106-110.

ускорителя практически не ухудшается по сравнению со случаем транспортировки. В [14] изучено ускорение КИП в шести магнитоизолированных ускоряющих промежутках. Показано, что оптимизированная в пространстве и времени инжекция дополнительных сильноточных электронных пучков в каспы приводит к увеличению монохроматичности и уменьшению расходимости ускоряемого СИП.

В данной работе представлены результаты 2d3v моделирования методом макрочастиц (описание кода – см. [11,12]) транспортировки и ускорения СИП в шести магнитоизолированных промежутках. Ускоряющее электрическое поле приложено к первому, третьему и пятому каспам. Второй, четвертый и шестой каспы используются для инжекции дополнительных компенсирующих электронных пучков, которые заменяют “отработавший” на предыдущем ускорительном промежутке электронный пучок. Продемонстрирована возможность транспортировки и ускорения трубчатого СИП в шести каспах. Показано, что инжекция дополнительных электронных пучков с оптимальными параметрами позволяет существенно улучшить функцию распределения ионного пучка на выходе ускорителя.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

На Рис.1 приведено осевое сечение одного каспа моделируемой ускоряющей структуры, конфигурация внешнего магнитного поля и области инжекции пучков. Длина одного каспа z_L = 5 см, радиус $r_L = 10$ см, первая треть системы – дрейфовое пространство, вторая треть – ускорительный промежуток длиной L_{acc} (для первого, третьего и пятого каспов), или область, в которой нет ускоряющего поля, и в правой части которой инжектируется дополнительный компенсирующий электронный пучок (для второго, четвертого и шестого каспов), последняя треть – дрейфовое пространство.

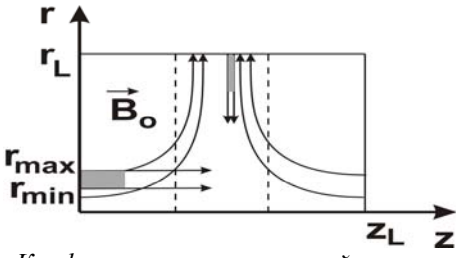

Рис.1. Конфигурация силовых линий внешнего магнитного поля, области инжекции трубчатых электронного и ионного пучков и дополнительного электронного пучка в расчетную область

Ускоряющее электрическое поле, приложенное в первом, третьем и пятом каспах, таково, что начальная кинетическая энергия компенсирующих электронных пучков ε_{0e} немного выше потенциального барьера ускоряющего поля в каждом каспе – $|q_e| E_z L_{acc} = 0,9 \cdot \varepsilon_{0e}$, что позволяет электронному пучку преодолеть ускоряющий потенциал в одном каспе, не нагружая ионный пучок. Слева в систему непрерывно инжектируются трубчатые замагниченный электронный и незамагниченный ионный пучки. Минимальный и максимальный радиусы пучков одинаковы: $r_{\min} = 2,75$ см, $r_{\max} = 3,46$ см, плотности тока в момент инжекции равны, плотность электронного пучка $n_{e0} = 4,2 \cdot 10^{12}$ см$^{-3}$, скорость инжекции электронного пучка $v_{e0} = 0,95 \cdot c$, начальная скорость ионного пучка (протоны) $v_{i0} = 0,285 \cdot c$, амплитуда внешнего магнитного поля $H_0 = 7,85$ кГс. Для моделирования шестикасповой системы, следующие каспы присоединяются справа с соответствующей инверсией внешнего магнитного поля. Внешние границы системы – идеально проводящий металл. Частицы, попавшие на металл удаляются из моделирования.

На Рис.2 представлены результаты моделирования транспортировки и ускорения сильноточного КИП в шести каспах. Распределения электронов в {r,z}-пространстве приведены на Рис.2,а,б. На Рис.2,в,г показаны соответствующие им распределения ионов. На Рис.2,д,е изображены, с помощью линий уровня, функции распределения ионов на правой границе шестого каспа $F_i(\varepsilon, r)$ в зависимости от энергии ε и поперечной координаты r.

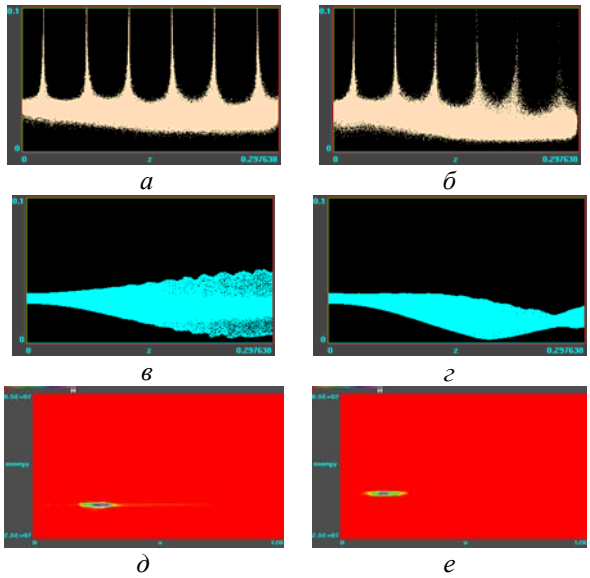

Рис.2. Транспортировка (а,в,д) и ускорение (б,г,е) сильноточного КИП в шести каспах. (а,б) – распределение электронов, (в,г) – распределение ионов в $\{r, z\}$-пространстве, r - поперечная координата, z - продольная координата. (д,е) - функции распределения ионов на правой границе шестого каспа в зависимости от энергии и поперечной координаты

Из Рис.2,а,б видно, что электроны сопровождают ионный пучок, дрейфуя в самосогласованных и внешних полях. В центре каждого каспа часть электронов пучка теряется, что приводит к слабой недокомпенсации объемного заряда ионного пучка и к его уширению (см. Рис.2,в,г). При ускорении (см. Рис.2,б,г,е), начальной кинетической энергии электронного пучка достаточно, чтобы преодолеть ускоряющий потенциал только в одном каспе. Поэтому, начиная со второго ускорительного каспа (третий касп в моделировании), электронный пучок подгружает ускоряемый ионный пучок, что отражается на его динамике в $\{r, z\}$-пространстве (см. Рис.2,г). Из

Рис.2,д,е видно, что в обоих случаях СИП после прохождения шести каспов является слаборасходящимся и практически монохроматичным по энергиям, с энергиями на выходе 40,6 МэВ (см. Рис.2,д), что соответствует энергии инжекции, и 43,6 МэВ (см. Рис.2,е), что соответствует ускорению в трех каспах.

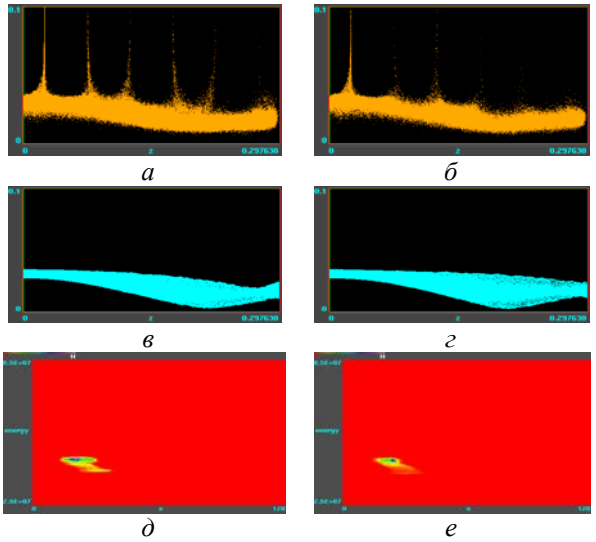

Рис.3. Ускорение сильноточного КИП в шести каспах с оптимизированной во времени и пространстве инжекцией дополнительных электронных пучков во втором, четвертом и шестом каспах. (а,б) – распределение электронов, (в,г) – распределение ионов в {r,z}-пространстве. (д,е) – функции распределения ионов на правой границе шестого каспа в зависимости от энергии и поперечной координаты

На Рис.3 приведены результаты моделирования ускорения СИП в шести каспах с оптимизированной во времени и пространстве инжекцией дополнительных электронных пучков во втором, четвертом и шестом каспах. Оптимизация в пространстве проведена подбором места расположения инжекторов и их длины таким образом, чтобы инжектируемый электронный пучок “оборачивал” ускоряемый ионный на выходе из каспа, в котором инжектируется электронный пучок. Оптимизация во времени проведена подбором момента старта инжекции дополнительных электронных пучков таким образом, чтобы в момент прихода ионного пучка на правую границу каспа, в котором инжектируется электронный пучок, эти два пучка встретились. Рис.3,а,в,д соответствует плотности дополнительно инжектируемых пучков $n_e^{add} = 4{,}2\cdot10^{12}$ см$^{-3}$, а Рис.3,б,г,е – $n_e^{add} = 8{,}4\cdot10^{13}$ см$^{-3}$, начальные скорости инжекции в обоих вариантах одинаковы – V_e^{add} =0,95c. Распределения электронов в *{r,z}*-пространстве приведены на Рис.3,а,б. На Рис.3,в,г показаны соответствующие им распределения ионов. На Рис.3,д,е изображены функции распределения ионов $F_i(\varepsilon, r)$ на правой границе шестого каспа. Из Рис.3,а,б видно, что электроны, инжектируемые слева в первый касп, сопровождают ионный пучок, дрейфуя в самосогласованных и внешних полях. Дополнительно инжектируемые электроны не вытесняют полностью инжектируемый слева в первый касп электронный пучок. Из Рис.3,д,е видно, что в обоих случаях СИП после прохождения шести каспов является слаборасходящимся и практически монохроматичным по энергиям, с энергиями на выходе 43.6 МэВ, что соответствует сумме ускоряющих потенциалов в трех каспах.

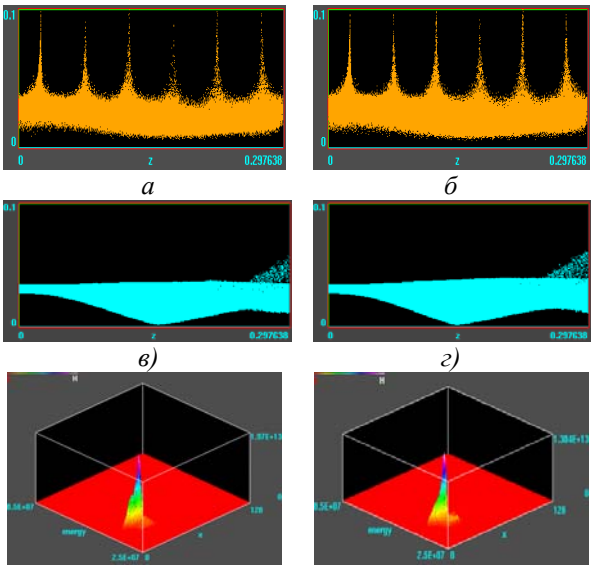

Рис.4. Ускорение сильноточного КИП в шести каспах с оптимизированной во времени и пространстве инжекцией дополнительных электронных пучков во втором, четвертом и шестом каспах. (а,б) – распределение электронов, (в,г) – распределение ионов в {r,z}-пространстве. (д,е) – функции распределения ионов на правой границе шестого каспа в зависимости от энергии и поперечной координаты

На Рис.4 приведены результаты моделирования ускорения СИП в шести каспах с оптимизированной во времени и пространстве инжекцией дополнительных электронных пучков во втором, четвертом и шестом каспах. Темп ускорения в первом, третьем и пятом каспах такой же, как и при моделировании, представленном на Рис.3. Рис.4,а,в,д соответствует плотности дополнительно инжектируемых пучков $n_e^{add} = 8{,}4\cdot10^{14}$ см$^{-3}$, а Рис.4,б,г,е $n_e^{add} = 2{,}1\cdot10^{15}$ см$^{-3}$, начальные скорости инжекции V_e^{add} =0,95c. Распределения электронов в *{r,z}*-пространстве приведены на Рис.4,а,б. На Рис.4,в,г показаны соответствующие распределения ионов. На Рис.4,д,е изображены функции распределения ионов $F_i(\varepsilon, r)$ на правой границе шестого каспа. Из Рис.4,а,б видно, что электроны, инжектируемые слева в первый касп, сопровождают ионный пучок в шести каспах. Однако плотность этого электронного пучка значительно ниже, чем в моделировании, представленном на Рис.3. Из Рис.4,д,е видно, что в обоих случаях СИП, после прохождения шести каспов, является слаборасходящимся и монохроматичным по энергиям, с энергиями на выходе 43.6 МэВ.

На Рис.5 приведено распределение дополнительно инжектируемых электронных пучков в *{r,z}*-пространстве на временах, соответствующих 4 временам пролета ионов через шесть каспов, а на Рис.6 – плотности дополнительно инжектируемых электронных пучков как функции *{r,z}* с помощью линий уровня.

Рис.5,а,в,д и 6,а,в,д соответствуют плотности дополнительно инжектируемых пучков $n_e^{add} = 8{,}4 \cdot 10^{14}$ см$^{-3}$, а Рис.5,б,г,е и 6,б,г,е – $n_e^{add} = 2{,}1 \cdot 10^{15}$ см$^{-3}$.

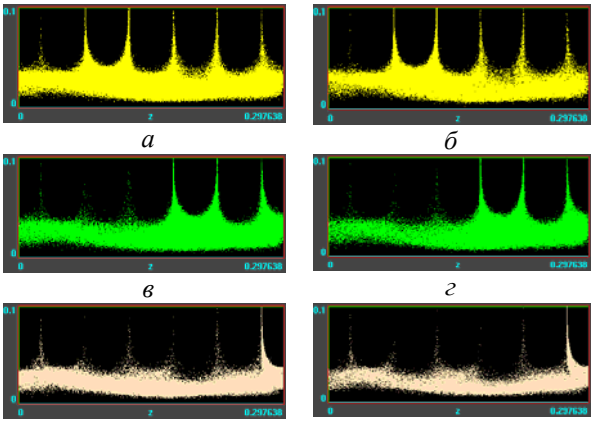

Рис.5. Распределение дополнительно инжектируемых электронных пучков в {r,z}-пространстве. (а,б) – электроны, инжектируемые во второй касп; (в,г) – электроны, инжектируемые в четвертый касп; (д,е) – электроны, инжектируемые в шестой касп

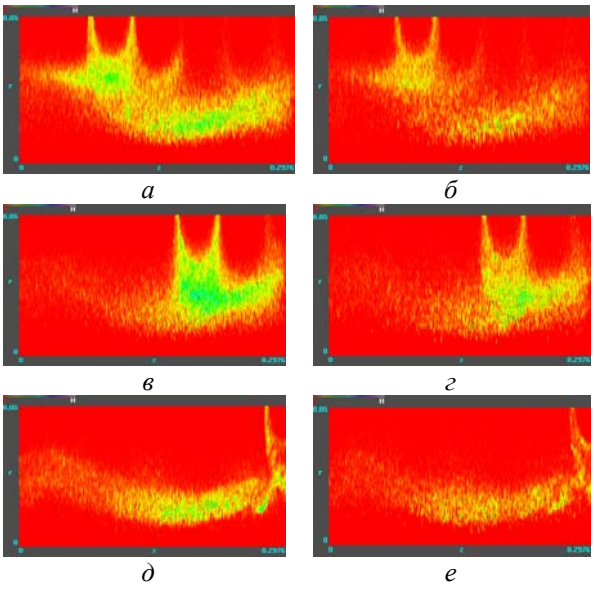

Рис.6. Плотности дополнительно инжектируемых электронных пучков как функции {r,z}. (а,б) – электроны, инжектируемые во второй касп; (в,г) – электроны, инжектируемые в четвертый касп; (д,е) – электроны, инжектируемые в шестой касп

Из Рис.5,а,б и Рис.6,а,б видно, что максимальная плотность дополнительно инжектируемых электронов во второй касп достигается в правой половине второго каспа и в левой половине третьего каспа. Из Рис.5,в,г и Рис.6,в,г видно, что максимальная плотность дополнительно инжектируемых электронов в четвертый касп достигается в правой половине четвертого каспа и в левой половине пятого каспа. И, наконец, из Рис.5,д,е и Рис.6,д,е видно, что максимальная плотность дополнительно инжектируемых электронов в шестой касп достигается в правой половине шестого каспа. Плотности дополнительных пучков в областях, где они достигают максимума, сравнимы с начальной плотностью сопровождающего электронного пучка n_{e0} . Таким образом, дополнительно инжектируемые во второй касп электроны заменяют инжектируемый слева в первый касп "отработавший" электронный пучок, который преодолел ускоряющий потенциал в первом каспе и при дальнейшем сопровождении СИП только "подгружает" последний. В свою очередь, электроны, инжектируемые в четвертый касп, вытесняют "отработавший" электронный пучок, инжектируемый во второй касп, и, наконец, электронный пучок, инжектируемый в шестой касп, заменяет "отработавший" электронный пучок, инжектируемый в четвертый касп. Отметим, однако, что достичь полной замены "отработавшего" электронного пучка новым не удается.

ВЫВОДЫ

Приведены результаты 2d3v-моделирования методом макрочастиц транспортировки и ускорения СИП в шести магнитоизолированных промежутках. Зарядовая и токовая компенсации осуществляются сопровождающим электронным пучком, а также дополнительно инжектируемыми электронными пучками. Ускоряющее электрическое поле приложено к первому, третьему и пятому каспам. Его величина такова, что начальная кинетическая энергия электронных пучков немного выше потенциального барьера ускоряющего поля в каждом каспе, что позволяет электронному пучку преодолеть ускоряющий потенциал в одном каспе, не нагружая СИП. Второй, четвертый и шестой каспы используются для инжекции дополнительных компенсирующих электронных пучков, которые заменяют "отработавший" на предыдущем ускоряющем промежутке электронный пучок. Продемонстрирована возможность транспортировки и ускорения КИП в шести каспах. Показано, что функция распределения СИП на выходе ускорителя не ухудшается по сравнению со случаем транспортировки. Инжекция оптимизированных по пространству, времени и плотности электронных пучков в каспы, приводит к увеличению моноэнергетичности ускоренного СИП и уменьшению его расходимости.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Ядерный синтез с инерционным удержанием. Современное состояние и перспективы для энергетики* / Под редакцией Б.Ю. Шаркова. М.: "Физматлит", 2005, с.263.
2. О.В. Батищев, В.И. Голота, В.И. Карась и др. Линейный индукционный ускоритель зарядово-компенсированных ионных пучков для инерциального УТС // *Физика плазмы.* 1993, т.19, №5, с.611.
3. S.S. Yu, W.R. Meier, R.P. Abbott, et al. *An Updated Point Design for Heavy Ion Fusion*: Lawrence Livermore National Laboratory preprint. UCRL-JC-150169-REV-1, 2002, p.10.
4. V.I. Karas', V.A. Kiyashko, E.A. Kornilov, Ya.B. Fainberg. Theoretical and experimental investigations of neutralized ion induction linac for inertial confinement fusion // *NIM.* 1989, v.A278, № 1, p.245.

5. В.И. Карась, Е.А. Корнилов, Я.Б. Файнберг. Линейный индукционный ускоритель зарядово-компенсированных ионных пучков для инерциального УТС // *Вопросы атомной науки и техники. Сер. «Плазменная электроника и новые методы ускорения»*. 1998, № 1(1), с.101.
6. В.И. Карась, В.В. Мухин, В.Е. Новиков, А.М. Набока. Об ускорении компенсированного ионного пучка в системах с магнитной изоляцией // *Физика плазмы*. 1987, т.13, № 4, с.494.
7. W. Peter, N. Rostoker. Theory of plasma injection into a magnetic field // *Physics of Fluids.* 1982, v.25, №4, p.730.
8. Н.Г. Белова, В.И. Карась, Ю.С. Сигов. Численное моделирование динамики пучков заряженных частиц в аксиально-симметричном неоднородном магнитном поле // *Физика плазмы.* 1990, т.16, №2, с.209.
9. Н.Г. Белова, В.И. Карась. Оптимизация ускорения и зарядовой компенсации сильноточного ионного пучка в двух ускоряющих зазорах линейного индукционного ускорителя // *Физика плазмы.* 1995, т.21, №12, с.1065.
10. В.И. Карась, Н.Г. Белова. Ускорение и устойчивость сильноточного ионного пучка в двух ускоряющих промежутках индукционного линейного ускорителя // *Физика плазмы.* 1997, т.23, № 4, с.355.
11. О.В. Богдан, В.И. Карась, Е.А. Корнилов, О.В. Мануйленко. 2.5-мерное численное моделирование сильноточного ионного линейного индукционного ускорителя // *Problems of Atomic Science and Technology. Ser. «Nuclear Physics Investigations».* 2008, № 3(49), p.34.
12. О.В. Богдан, В.И. Карась, Е.А. Корнилов, О.В. Мануйленко. 2.5-мерное численное моделирование сильноточного ионного линейного индукционного ускорителя // *Физика плазмы.* 2008, т.34, №8, с.725.
13. О.В. Богдан, В.И. Карась, Е.А. Корнилов, О.В. Мануйленко. Численное моделирование сильноточного ионного линейного индукционного ускорителя методом макрочастиц // *Вопросы атомной науки и техники. Сер. «Плазменная электроника и новые методы ускорения».* 2008, №4(6), с.83.
14. O.V. Bogdan, V.I. Karas', E.A. Kornilov, O.V. Manuilenko. High-current Ion Induction Linac for Heavy Ion Fusion: 2D3V Numerical Simulation // *Problems of Atomic Science and Technology. Ser. «Plasma Physics».* 2008, № 12(14), p.110.

Статья поступила в редакцию 06.10.2009 г.

NUMERICAL SIMULATION OF HIGH-CURRENT ION LINEAR INDUCTION ACCELERATOR WITH ADDITIONAL ELECTRON BEAM INJECTION

O.V. Bogdan, V.I. Karas, E.A. Kornilov, O.V. Manuilenko

The 2d3v particle-in-cell simulations of the transportation and acceleration of a high-current tubular ion beam through six magnetoinsulated accelerating gaps are presented. Charge and current compensations are carried out by an accompanying electron beam, and also by additionally injected electron beams. The accelerating electric field is enclosed to the first, third and fifth cusps. Its magnitudes are those, that initial kinetic energy of compensating electron beams is little bit higher than a potential barrier of an accelerating field in each cusp, that allows an electron beam to overcome accelerating potential in one cusp. The second, fourth and sixth cusps in which the accelerating field is absent, are used for injection of additional compensating electron beams which replace the electron beam which has "worked-out" on the previous accelerating gap. The simulations involve solving a complete set of Maxwell's equations with charge-conserving scheme for calculating the current density on a mesh, and relativistic motion equations for charged particles. The possibility of transporting and acceleration of a high-current tubular ion beam in six cusps is shown. It is shown, that distribution function of a high-current ion beam on an output of the accelerator essentially improves due to optimization of parameters of additionally injected electron beams.

ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СИЛЬНОСТРУМОВОГО ІОННОГО ЛІНІЙНОГО ІНДУКЦІЙНОГО ПРИСКОРЮВАЧА З ІНЖЕКЦІЄЮ ДОДАТКОВИХ ЕЛЕКТРОННИХ ПУЧКІВ

О.В. Богдан, В.І. Карась, Є.О. Корнилов, О.В. Мануйленко

Представлено результати 2d3v-моделювання методом макрочастинок транспортування та прискорення сильнострумового трубчастого іонного пучка у шести магнітоізольованих проміжках. Зарядова й струмова компенсації здійснюються супроводжуючим електронним пучком, а також додатково інжектованими електронними пучками. Прискорююче електричне поле прикладене до першого, третього та п'ятого каспів. Його величина така, що початкова кінетична енергія компенсуючих електронних пучків дещо вище ніж потенціальний бар'єр прискорюючого поля у кожному каспі, що дозволяє електронному пучку подолати прискорюючий потенціал в одному каспі. Другий, четвертий та шостий каспи, в яких прискорююче поле відсутнє, використовуються для інжекції додаткових компенсуючих електронних пучків, що замінюють "відпрацьований" на попередньому прискорюючому проміжку електронний пучок. При чисельному моделюванні розв'язувались повні рівняння Максвела та релятивістські рівняння руху заряджених частинок. Для обчислення густин заряду та струму на сітці застосована схема, що зберігає заряд. Продемонстрована можливість транспортування та прискорення сильнострумового трубчастого іонного пучка у шести каспах. Показано, що функція розподілу сильнострумового іонного пучка на виході прискорювача суттєво покращується завдяки оптимізації параметрів інжектованих додаткових електронних пучків.