

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИЛЬНОТОЧНОГО ИОННОГО
ЛИНЕЙНОГО ИНДУКЦИОННОГО УСКОРИТЕЛЯ
МЕТОДОМ МАКРОЧАСТИЦ**

О.В. Богдан, В.И. Карась, Е.А. Корнилов, О.В. Мануйленко¹

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

¹E-mail: ovm@kipt.kharkov.ua

Приведены результаты численного моделирования методом макрочастиц транспортировки и ускорения сильноточного трубчатого ионного пучка, сопровождаемого компенсирующим электронным пучком, в трех магнитоизолированных ускоряющих промежутках. Токи пучков, а также величины внешнего магнитного поля выбраны близкими к экспериментальным. Показано, что при небольшом темпе ускорения, когда кинетическая энергия компенсирующего электронного пучка больше потенциального барьера ускоряющего поля, качество функции распределения сильноточного ионного пучка на выходе ускорителя практически не ухудшается по сравнению со случаем транспортировки. В случае же большого темпа ускорения, когда кинетической энергии компенсирующего электронного пучка недостаточно для преодоления потенциального барьера ускоряющего поля, качество функции распределения сильноточного ионного пучка на выходе существенно ухудшается по сравнению с режимом транспортировки. Показано, что оптимизированная по пространству и времени инжекция дополнительных сильноточных электронных пучков в каспы приводит к увеличению моноэнергетичности ускоряемого ионного пучка и к уменьшению его расходимости на выходе ускорителя.

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время рассматриваются два метода получения сильноточного ионного пучка (СИП) для инерциального термоядерного синтеза (ИТС) с помощью линейных ускорителей [1-3]. Первый основан на использовании линейных резонансных ускорителей с накопительными кольцами. Второй – на использовании индукционных ускорителей. Достоинством первого метода является высокий темп ускорения (1...5 МэВ/м) и высокий КПД (до 30%). Конечная энергия ионов должна достигать 100 ГэВ. Ускоренные ионы накапливаются в накопительных кольцах и далее направляются в компрессионные кольца, где импульс сжимается во времени. При этом должно быть достигнуто сжатие импульса по длительности более чем в 10^4 раз. При использовании вакуумного линейного индукционного ускорителя (ЛИУ) [1,2,4-7] от 16 до 120, в зависимости от проекта, пучков ионов одновременно ускоряются в квадрупольных линзах, которые осуществляют их поперечную фокусировку. По мере набора энергии число пучков уменьшается за счет сведения нескольких ионных пучков в один. Конечная энергия ионов должна достигать величины порядка 10 ГэВ с энергосодержанием порядка 10 МДж при длительности импульса несколько десятков наносекунд. Достоинствами такого подхода является то, что ЛИУ может работать при большой частоте импульсов, ускорять с высоким КПД (более 30%, см., например, [7]) сильноточные пучки практически любых ионов, а также просто и естественно осуществлять временное сжатие токового импульса в процессе ускорения, что позволяет устранить операции, связанные с усилением тока за счет компрессии его во времени.

Другим путем получения большого тока ионного

пучка с помощью ЛИУ при небольшой скорости ионов является отказ от вакуумных систем транспортировки пучка – квадруполей и соленоидов, и использование методов коллективной фокусировки, в которых силы пространственного заряда ионного пучка скомпенсированы электронами [2,8-12], а электронный ток подавлен магнитной изоляцией ускоряющих промежутков [13,14]. Ускоряемый ток ионов в таком ЛИУ при обеспечении зарядовой и токовой компенсации СИП в магнитоизолированном ускоряющем зазоре может составлять десятки килоампер, что позволяет для проблемы ИТС, понизить конечную энергию ионов до нескольких сотен мегаэлектрон 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 хорошо известный механизм транспортировки компенсированного ионного пучка (КИП) через магнитный барьер [15] не реализуется, потому что в данном случае не может возникнуть азимутальное поляризационное электрическое поле. Механизм зарядовой и токовой компенсации СИП с помощью электронного пучка в осесимметричном ускоряющем промежутке предложен в [14,16-18]. Его физический смысл состоит в том, что специально инжектируемый компенсирующий электронный пучок дрейфует через касп благодаря самосогласованному азимутальному магнитному полю и электрическому полю, обусловленному небольшим радиальным разделением ионного и электронного пучков. Полагая, что внешнее магнитное поле имеет касповую аксиально-симметричную конфигурацию

$$H_r = -H_o I_1(kr) \sin(kz), H_z = -H_o I_o(kr) \cos(kz), (1)$$

где r – поперечная координата, $z \in [0, L]$ – продольная координата, L – длина каспа, $k = \pi / L$, H_0 – амплитуда внешнего магнитного поля, $I_0(x)$ и $I_1(x)$ – модифицированные функции Бесселя, а также, что в систему с полем (1) и продольным ускоряющим электрическим полем E_z инжектируются трубчатые электронный и ионный пучки одинакового поперечного сечения (a, Δ – соответственно радиус и толщина пучков) с одинаковой плотностью тока $|q_e|n_{e0}v_{e0} = q_i n_{i0} v_{i0}$ (q, n, V – заряд, плотность, скорость частиц, индекс e относится к электронам, а i – к ионам) для нейтрализации СИП сопровождающим его электронным пучком, параметры последнего должны удовлетворять условиям:

$$|q_e|E_z L < \varepsilon_{0e} \ll \frac{q_e^2 H_0^2 I_0^2 (ka) L^2}{2m_e c^2}, \quad (2,a)$$

$$n_e \leq \frac{H_0^2 I_1^2 (ka)}{4\pi |q_e| E_z L} \left(\frac{L}{a} \right)^2, \quad (2,b)$$

где m_e – масса электрона, c – скорость света, ε_{0e} – кинетическая энергия электронов. (2,a) означает малость ларморовского радиуса электронов по сравнению с характерным размером каспа, а также то, что энергия электронов достаточно велика, чтобы не нагружать ионный пучок. (2,b) означает, что возбуждаемое азимутальным дрейфом электронов магнитное поле незначительно деформирует внешнее поле каспа.

Ионный же пучок должен быть достаточно сильноточным:

$$n_i \geq \frac{H_0^2 I_1^2 (ka)}{4\pi (\varepsilon_{0e} - |q_e| E_z L)}, \quad \Delta \geq \frac{c \Omega_i}{\omega_i^2}, \quad (3)$$

где $\Omega_i = q_i H / (m_i c)$, $\omega_i = \sqrt{4\pi q_i^2 n_i / m_i}$, соответственно, ларморовская и ленгмюровская частоты ионов. Возможность транспортировки и ускорения сильноточного КИП в условиях (2,a), (2,b) и (3) продемонстрирована в [16-18].

В настоящей работе представлены результаты численного моделирования методом макрочастиц с решением полных уравнений Максвелла [19,20], транспортировки и ускорения трубчатого СИП, сопровождаемого электронным пучком. Параметры моделирования выбраны близкими к экспериментальным, которые проводятся в ННЦ ХФТИ.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

На Рис.1 приведено осевое сечение одного каспа, конфигурация магнитного поля (1) и области инжекции пучков.

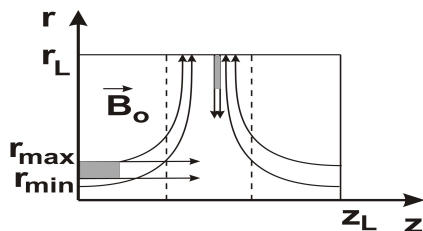


Рис.1. Конфигурация внешнего магнитного поля и области инжекции пучков в расчетную область

Длина системы $z_L=5$ см, радиус $r_L=10$ см, первая треть системы – дрейфовое пространство, вторая треть – ускорятельный промежуток, во второй половине которого может инжектироваться дополнительный электронный пучок, последняя треть – дрейфовое пространство.

Слева в систему непрерывно инжектируются трубчатые электронный и 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 в одном варианте $v_{e0}=0,95c$, а в другом – $v_{e0}=0,99c$, начальная скорость ионного пучка (протоны) $v_{i0}=0,285c$, амплитуда внешнего магнитного поля (1) $H_0=7,85$ кГс. Для моделирования трех-касповой системы следующие каспы присоединяются справа. Внешние границы – металл. Частицы, попавшие на внешние границы, удаляются из моделирования.

На Рис.2 представлены результаты моделирования транспортировки ($E_z=0$) КИП через 3 каспа, когда условия (2), (3) выполнены. Рис.2,а,в,д соответствуют скорости инжекции электронного пучка $v_{e0}=0,95c$, а Рис.2,б,г,е – $v_{e0}=0,99c$.

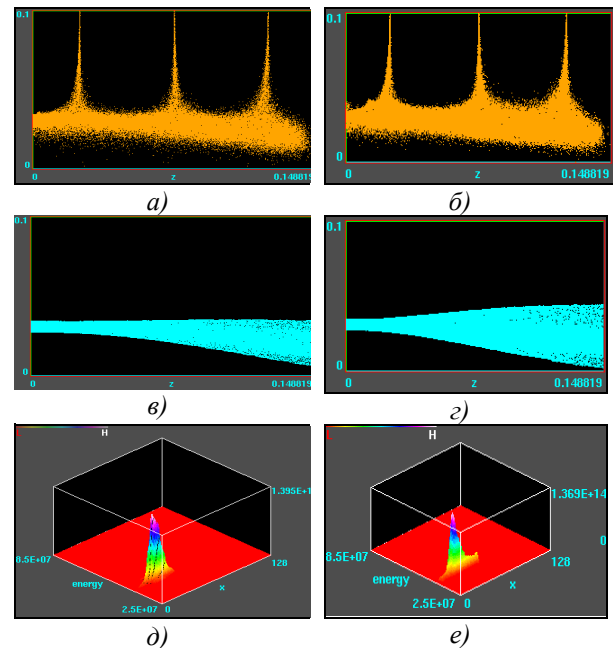


Рис.2. Транспортировка сильноточного КИП через три каспа: а,б – распределение электронов; в,г – распределение ионов в $\{r,z\}$ -пространстве, r – поперечная координата, z – продольная координата; д,е – функции распределения ионов на правой границе третьего каспа в зависимости от энергии и поперечной координаты

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 функции распределения ионов на правой границе третьего каспа $F_i(\varepsilon, r)$ в зависимости от энергии ε и поперечной координаты r . 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 (Рис.2,в,г). Из Рис.2,д,е видно, что в обоих случаях СИП после прохождения трех каспов является слабоборасходящимся и практически монохроматичным по энергии, с энергией на выходе 40,6 МэВ, что соответствует энергии инжекции.

На Рис.3 приведены результаты моделирования ускорения сильноточного КИП в 3 каспах, когда темп ускорения в каждом каспе мал: $|q_e|E_z L_{acc} = 0,254\epsilon_{0e}$. При этом кинетической энергии электронного пучка ϵ_{0e} достаточно, чтобы преодолеть ускоряющее поле в трех каспах. Рис.3,а,в,д соответствуют $v_{e0}=0,95c$, а Рис.3,б,г,е – $v_{e0}=0,99c$. Из Рис.3,а,б видно, что, как и в случае транспортировки, электронный пучок дрейфует совместно с ионным, обеспечивая компенсацию по току и заряду. В центре каждого каспа часть электронов теряется. Качество $F_i(\epsilon, r)$ – разброс по поперечной координате и энергии (Рис.3,д,е), практически не ухудшается по сравнению со случаем транспортировки (Рис.2,д,е). Функции распределения смещены по энергии на величину около 1.0 МэВ (Рис.3,д) и 2.3 МэВ (Рис.3,е) по сравнению со случаем $E_z=0$ (Рис.2,д,е).

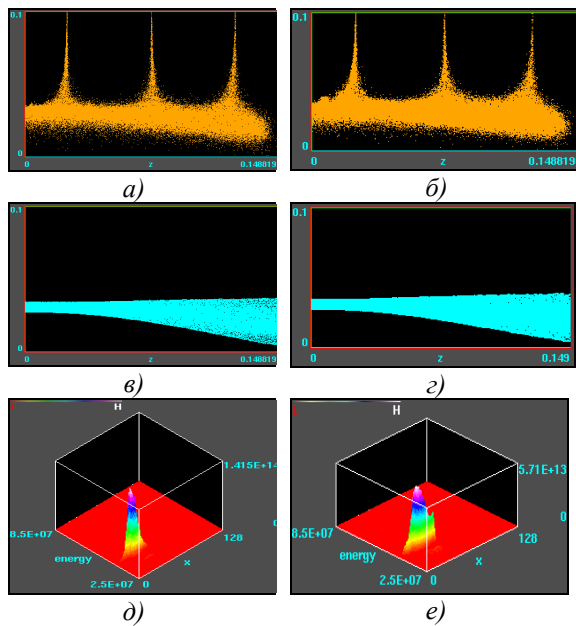


Рис.3. Ускорение сильноточного КИП в трех каспах: а,б – распределение электронов; в,г – распределение ионов в $\{r,z\}$ -пространстве, r – поперечная координата, z – продольная координата; д,е – функции распределения ионов на правой границе третьего каспа в зависимости от энергии и поперечной координаты

На Рис.4 представлены результаты моделирования ускорения сильноточного КИП в 3 каспах, когда темп ускорения высок: $|q_e|E_z L_{acc} = 4 \cdot \epsilon_{0e}$. При этом кинетической энергии электронного пучка ϵ_{0e} недостаточно, чтобы преодолеть ускоряющее поле даже в одном каспе, что приводит к нагружению ионного пучка электронным и ухудшению качества $F_i(\epsilon, r)$ на

выходе. Рис.4,а,в,д,ж соответствуют $v_{e0}=0,95c$, а Рис.4,б,г,е,з – $v_{e0}=0,99c$. Из Рис.4 видно, что ситуация ухудшилась по сравнению со случаями транспортировки (Рис.2) и ускорения с малым темпом (Рис.3). Электронный пучок запирается в третьем каспе (Рис.4,а,б), что ведет к уширению ионного пучка (Рис.4,в,г) и ухудшению качества $F_i(\epsilon, r)$ на выходе – их разброс по поперечной координате и энергии (Рис.4,д,е) увеличивается по сравнению со случаями транспортировки (Рис.2,д,е) и ускорения с малым темпом ускорения (Рис.3,д,е). На Рис.4,ж,з приведен вид сверху для $F_i(\epsilon, r)$, представленных на Рис.4,д,е. Видно, что энергия ускоренного пучка приблизительно равна 55 МэВ (Рис.4,ж) и 78 МэВ (Рис.4,з), что соответствует ускоряющим потенциалам.

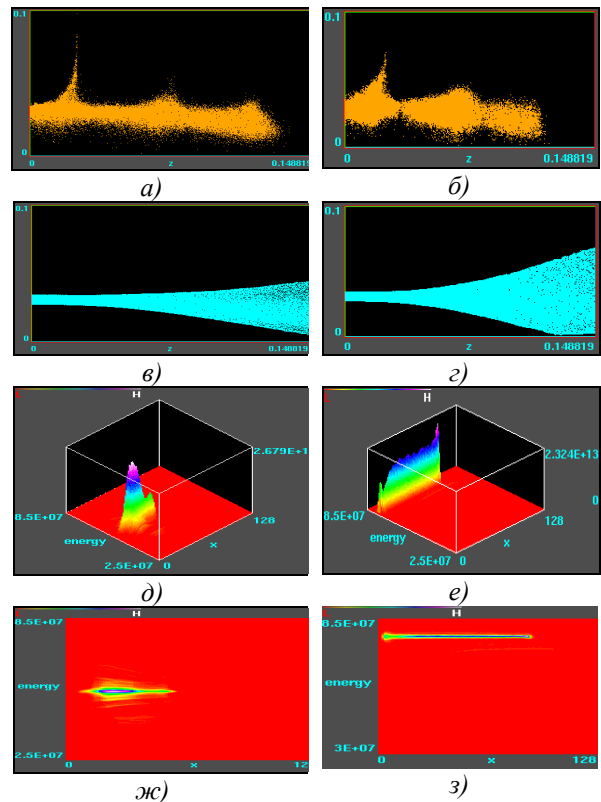


Рис.4. Ускорение сильноточного КИП в трех каспах: а,б – распределение электронов; в,г – распределение ионов в $\{r,z\}$ -пространстве, r – поперечная координата, z – продольная координата; д,е – функции распределения ионов на правой границе третьего каспа в зависимости от энергии и поперечной координаты; ж,з – функции распределения ионов на правой границе третьего каспа, вид сверху

На Рис.5 приведены результаты моделирования ускорения сильноточного КИП в 3 каспах, когда темп ускорения велик (параметры задачи совпадают с приведенными на Рис.4), а в каждый касп инжектировался сверху дополнительный сильноточный электронный пучок (см. Рис.1) со скоростью, равной скорости “основного” пучка, и плотностью $n_e^{ad} = 7.1 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$. Место инжекции – расстояние от центра каждого каспа, и время инжекции подобраны

так, чтобы фронты дополнительных пучков подошли к фронту “основного” КИП в одни и те же моменты времени в каждом каспе, а также дополнительные пучки “оборачивали” основной КИП. На Рис.5,а,б изображены $F_i(\epsilon, r)$ для $v_{e0}=0,95c$ и $v_{e0}=0,99c$, а на Рис.5,в,г – вид сверху для этих $F_i(\epsilon, r)$. Как видно из Рис.5, инжекция дополнительных электронных пучков привела к существенному уменьшению разброса по поперечной координате по сравнению со случаем ее отсутствия (Рис.4), кроме того, уменьшился разброс по энергии. Энергия ионного пучка на выходе равна 55 МэВ (Рис.5,в) и 78 МэВ (Рис.5,г), что соответствует ускоряющим потенциалам.

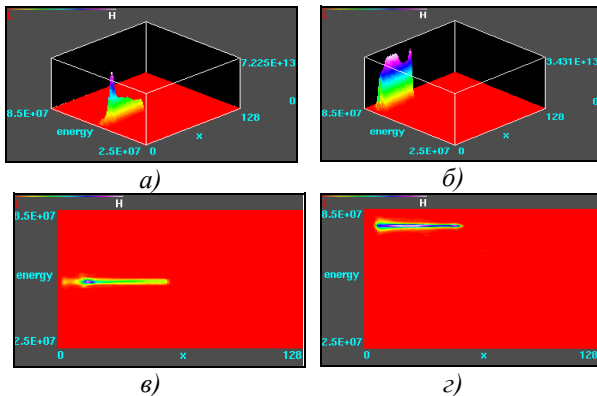


Рис.5. Ускорение сильноточного КИП в трех каспах. В каждый касп инжектируется сверху дополнительный сильноточный электронный пучок: а,б - функции распределения ионов на правой границе третьего каспа в зависимости от энергии и поперечной координаты; в,г – функции распределения ионов на правой границе третьего каспа, вид сверху

На Рис.6 представлены результаты численного моделирования транспортировки сильноточного КИП, когда $H_0 = 5$ кГс, $n_{e0} = 5,6 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$, $v_{e0} = 0,92c$, $v_{i0} = 0,285c$, $r_{\min} = 2,45$ см, $r_{\max} = 2,70$ см. Условия (2,а), (2,б) и (3) выполнены.

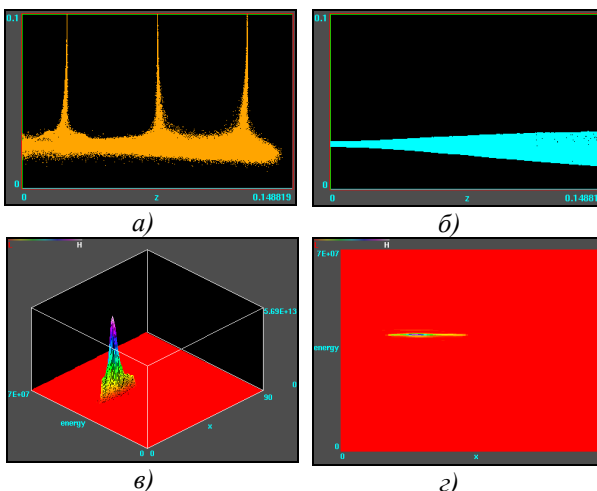


Рис.6. Транспортировка сильноточного КИП в трех каспах; а – распределение электронов; б – ионов в $\{r, z\}$ -пространстве; в – функция распределения ионов на правой границе третьего каспа в зависимости от энергии и поперечной координаты; г – функция распределения ионов на правой границе третьего каспа, вид сверху

Как видно из Рис.6,а,б, даже для столь малых внешних магнитных полей возможна транспортировка сильноточного КИП через 3 каспа. Как и в случае более сильных магнитных полей (см. Рис.2), электронный пучок сопровождает ионный во всех 3 каспах (Рис.6,а,б). $F_i(\epsilon, r)$ (Рис.6,в,г) практически моноэнергетична, с энергией, соответствующей энергии инжекции 40,6 МэВ. Небольшое уширение $F_i(\epsilon, r)$ по радиусу на выходе связано со слабой недокомпенсацией ионного пучка по заряду из-за потери части электронов в каждом каспе (Рис.6,а).

На Рис.7 приведены результаты моделирования ускорения сильноточного КИП в 3 каспах, когда темп ускорения в каждом каспе мал: $|q_e|E_z L_{acc} = 0,5 \epsilon_{0e}$. Остальные параметры задачи такие же, как на Рис.6.

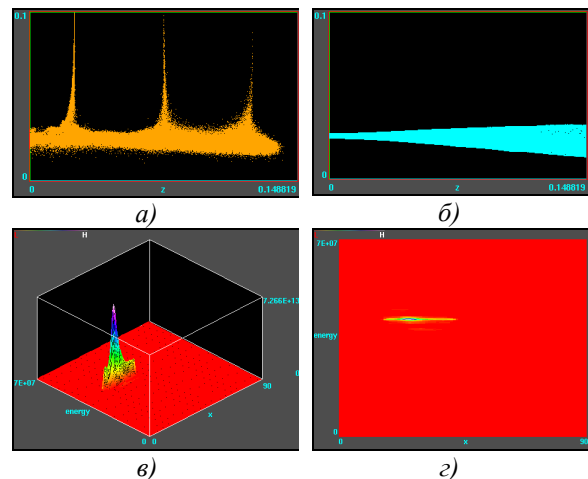


Рис.7. Ускорение сильноточного КИП в трех каспах: а – распределение электронов; б – ионов в $\{r, z\}$ -пространстве; в – функция распределения ионов на правой границе третьего каспа в зависимости от энергии и поперечной координаты; г – функция распределения ионов на правой границе третьего каспа, вид сверху

Из Рис.7,а,б видно, что, как и в случае транспортировки (Рис.6,а,б), а также в случае ускорения в более сильных внешних магнитных полях (Рис.3,а-г), электронный пучок дрейфует совместно с ионным, обеспечивая компенсацию по току и заряду. Качество $F_i(\epsilon, r)$ на выходе – разброс по поперечной координате и энергии (Рис.7,в,г), так же как и при ускорении в больших полях (Рис.3,д,е), практически не ухудшается по сравнению со случаем транспортировки (Рис.6,в,г). $F_i(\epsilon, r)$ смещена по энергии на величину примерно 1.2 МэВ (Рис.7,г) по сравнению со случаем отсутствия ускоряющего поля (Рис.6,г).

На Рис.8 представлены результаты моделирования ускорения сильноточного КИП в 3 каспах, когда темп ускорения высок: $|q_e|E_z L_{acc} = 2 \cdot \epsilon_{0e}$. Кинетической энергии электронного пучка ϵ_{0e} недостаточно, чтобы преодолеть ускоряющее поле в одном каспе, что приводит к нагружению ионного пучка электронным и ухудшению качества $F_i(\epsilon, r)$ на выходе. Электронный пучок запирается в третьем каспе (Рис.8,а), что ведет к уширению ионного (Рис.8,б) и ухудшению качества функции распределения на вы-

ходе – ее разброс по поперечной координате и энергии (Рис.8,в,г) увеличивается по сравнению со случаями транспортировки (Рис.6,в,г) и ускорения с малым темпом (Рис.7,в,г).

Отметим, что аналогичное поведение электронного и ионного пучков наблюдалось и при ускорении в больших ведущих магнитных полях (Рис.4). Энергия ускоренного ионного пучка приблизительно равна 45.4 МэВ (Рис.8,г), что соответствует ускоряющим потенциалам.

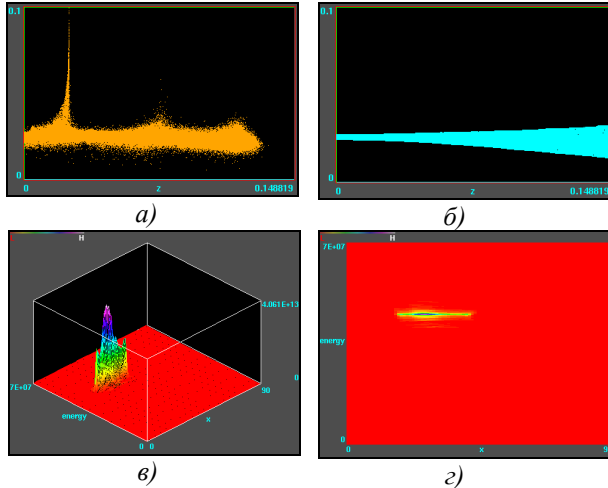


Рис.8. Ускорение сильноточного КИП в трех каспах: а – распределение электронов; б – ионов в $\{r,z\}$ -пространстве; в – функция распределения ионов на правой границе третьего каспа в зависимости от энергии и поперечной координаты; г – функция распределения ионов на правой границе третьего каспа, вид сверху

ВЫВОДЫ

Приведены результаты численного моделирования методом макрочастиц транспортировки и ускорения трубчатого СИП, сопровождаемого компенсирующим электронным пучком, в трех магнитоизолированных ускоряющих промежутках. Моделирования выполнены с решением полных уравнений Максвелла и релятивистских уравнений движения частиц. Амплитуда внешнего магнитного поля, плотности электронного и ионного пучков, их радиусы и толщины выбраны близкими к экспериментам ННЦ ХФТИ. Показано, что при небольшом темпе ускорения, когда кинетическая энергия компенсирующего электронного пучка больше потенциального барьера ускоряющего поля, качество функции распределения ионного пучка на выходе ускорителя практически не ухудшается по сравнению с режимом транспортировки. В случае же большого темпа ускорения, когда кинетической энергии электронного пучка недостаточно для преодоления потенциального барьера ускоряющего поля, качество функции распределения ионного пучка на выходе существенно ухудшается по сравнению с режимом транспортировки. Показано, что оптимизированная по пространству и времени инжекция дополнительных сильноточных электронных пучков в каспы приво-

дит к увеличению моноэнергетичности ускоряемого ионного пучка и к уменьшению его расходимости.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Ядерный синтез с инерционным удержанием. Современное состояние и перспективы для энергетики* / Под редакцией Б.Ю. Шаркова. М.: "Физматлит", 2005, 263 p.
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. B. Sharkov, D. Koshkarev, M. Churasov. HIF activities in Russia // *Nuclear Instruments and Methods in Phys. Res. A*. 1998, v.415, №1-2, p.20.
4. R.O. Bangerter. *The induction approach to heavy ion inertial fusion: accelerator and target considerations*: Lawrence Berkeley Laboratory preprint. LBL-33798, 1993, 26 p.
5. A. Friedman, R.O. Bangerter, W.B. Herrmannsfeldt. *Progress in heavy-ion drivers for inertial fusion*: Lawrence Livermore National Laboratory preprint. UCRL-JC-117332, 1994, 16 p.
6. J. Barnard, R. Bangerter, A. Faltens et al. Induction accelerator architectures for heavy ion fusion // *Nuclear Instruments and Methods in Phys. Res. A*. 1998, v.415, №1-2, p.218.
7. 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, 10 p.
8. Ю.Е. Коляда, Е.А. Корнилов, Я.Б. Файнберг, В.А. Кияшко. Формирование и ускорение сильноточных высокоэнергетичных ионных пучков в плазме индукционными электрическими полями // *Письма в ЖТФ*. 1976, т.2, №20, с.916.
9. В.А. Кияшко, Ю.Е. Коляда, Е.А. Корнилов, Я.Б. Файнберг. Линейный плазменный индукционный ускоритель – источник мощных сильноточных ионных пучков // *Письма в ЖТФ*. 1977, т.3, №23, с.1257.
10. Ю.Е. Коляда, Е.А. Корнилов, В.А. Винокуров. Ионный индукционный ускоритель с коллективной фокусировкой (ИИДУС) // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Техника физического эксперимента»*. 1987, №3(4), с.343.
11. 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 // *Nuclear Instruments and Methods in Phys. Res. A*. 1989, v.278, №1, p.245.
12. В.И.Карась, Е.А.Корнилов, Я.Б.Файнберг. Линейный индукционный ускоритель зарядово-компенсированных ионных пучков для инерциального УТС // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Плазменная электроника и новые методы ускорения»*. 1998, №1(1), с.101.

13. А.И.Морозов, С.В.Лебедев. Плазмооптика // *Вопросы теории плазмы*. М.: "Атомиздат", 1974, т.8, с.243.
14. 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.
15. W. Peter, N. Rostoker. Theory of plasma injection into a magnetic field // *Physics of Fluids*. 1982, v.25, №4, p.730.
16. 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.
17. 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.
18. 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.
19. О.В. Богдан, В.И. Карась, Е.А. Корнилов, О.В. Мануйленко. 2.5-мерное численное моделирование сильноточного ионного ЛИУ // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Ядерно-физические исследования»*. 2008, №3, p.34.
20. J.P. Verboncoeur, A.B. Langdon, N.T. Gladd. An object-oriented electromagnetic PIC code // *Computer Physics Communications*. 1995, v.87, №1-2, p.199.

Статья поступила в редакцию 05.06.2008 г.

COMPUTER SIMULATION OF HIGH-CURRENT ION INDUCTION LINAC USING MACROPARTICLES

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

The 2d3v particle-in-cell simulation results of transport and acceleration of hollow high-current ion beam compensated by electron beam in 3 magnetoinulated accelerating gaps are presented. The beam currents, and the external magnetic field magnitudes are close to NSC KIPT experiments. It is shown, that at small acceleration rates, when the compensating electron beam kinetic energy is higher than a potential barrier of the accelerating field, the quality of ion distribution function on the accelerator exit practically is not worsened in comparison with the transportation mode. In the case of large acceleration rate, when the electron beam kinetic energy is not enough for overcoming a accelerating field potential barrier, the quality of ion distribution function on the accelerator exit is essentially worsened in comparison with the transportation mode. It is shown, that the optimized in space and time injection of additional high current electron beams in cusps results in increase of accelerated ion beam monochromaticity and to reduction it divergency on an accelerator exit.

ЧИСЛОВЕ МОДЕЛЮВАННЯ СИЛЬНОСТРУМОВОГО ІОННОГО ЛІНІЙНОГО ІНДУКЦІЙНОГО ПРИСКОРЮВАЧА МЕТОДОМ МАКРОЧАСТИНОК

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

Наведено результати числового моделювання методом макрочастинок транспортування та прискорення трубчастого сильноточного іонного пучка, який супроводжується компенсуючим електронним пучком у трьох магнітоізолюваних прискорюючих проміжках. Струми пучків і зовнішні магнітні поля обрані близькими до експериментальних. Показано, що при малому темпі прискорення, коли кінетична енергія компенсуючого електронного пучка більша за потенціальний бар'єр прискорюючого поля, якість функції розподілу іонного пучка на виході прискорювача практично не погіршується у порівнянні з режимом транспортування. У випадку ж великого темпу прискорення, коли кінетичної енергії компенсуючого електронного пучка недостатньо для здолання потенціального бар'єру прискорюючого поля, якість функції розподілу іонного пучка на виході суттєво погіршується у порівнянні з режимом транспортування. Показано, що оптимізована у просторі і часі інжекція додаткових сильноточових електронних пучків у кожен касп призводить до збільшення моноенергетичності прискорюючого іонного пучка і до зменшення його розбіжності на виході прискорювача.