

ЭЛЕМЕНТЫ СЕКЦИИ СИЛЬНОТОЧНОГО ЛИНЕЙНОГО ИНДУКЦИОННОГО УСКОРИТЕЛЯ ЗАРЯДОВО-КОМПЕНСИРОВАННЫХ ИОННЫХ ПУЧКОВ С ПОВЫШЕННЫМИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

А.Г. Гурин¹, Е.А. Корнилов², Р.С. Ложкин²

¹*Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»;*

²*Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»,
Харьков, Украина*

E-mail: AGurin@KPI.Kharkov.ua; Kornilov@KIPT.Kharkov.ua; Lozhkin@KIPT.Kharkov.ua

Представлен метод расчета основных элементов секции сильноточного линейного индукционного ускорителя зарядово-компенсированных ионных пучков, оптимизированных с целью получения наибольшего КПД, темпа ускорения и средней мощности пучка. Показана возможность создания секции ускорителя на среднюю мощность пучка 100 кВт при КПД индукционной системы на уровне 0,7, токе пучка в импульсе 20 кА, темпе ускорения 2 МэВ/м, длительности ускоряющего импульса 125 нс, частоте посылок 13,3 Гц, величине ускоряющего напряжения 3 МВ.

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время рассматривается возможность получения сильноточного ионного пучка (СИП) для инерциального термоядерного синтеза с помощью линейного индукционного ускорителя ионов с использованием методов коллективной фокусировки, в которых силы пространственного заряда ионного пучка скомпенсированы электронами, а электронный ток подавлен магнитной изоляцией ускоряющих промежутков [1,2]. Предварительные оценки показывают, что имеются возможности создания установки для ИТС с 12 радиально расположенными индукционными ускорителями, каждый из которых обеспечит на мишени пучок ионов с энергией порядка 300 МэВ, током 100 кА, при длительности импульса 20 нс, что даёт общий вклад энергии 9 МДж. При этом предполагается, что инжектор модуля и все ускоряющие секции (кроме последней) будут формировать пучок ионов с током 20 кА и длительностью 125 нс. Продольная компрессия пучка предположительно может быть ограничена 6,25-кратным сжатием, причем для этого можно будет использовать последние ускоряющие секции, запитав их импульсом необходимой формы.

Целью данной статьи является рассмотрение возможности оптимизации конструкции линейного индукционного ускорителя зарядово-компенсированных ионных пучков с точки зрения повышения КПД, темпа ускорения и обеспечения большой средней мощности пучка.

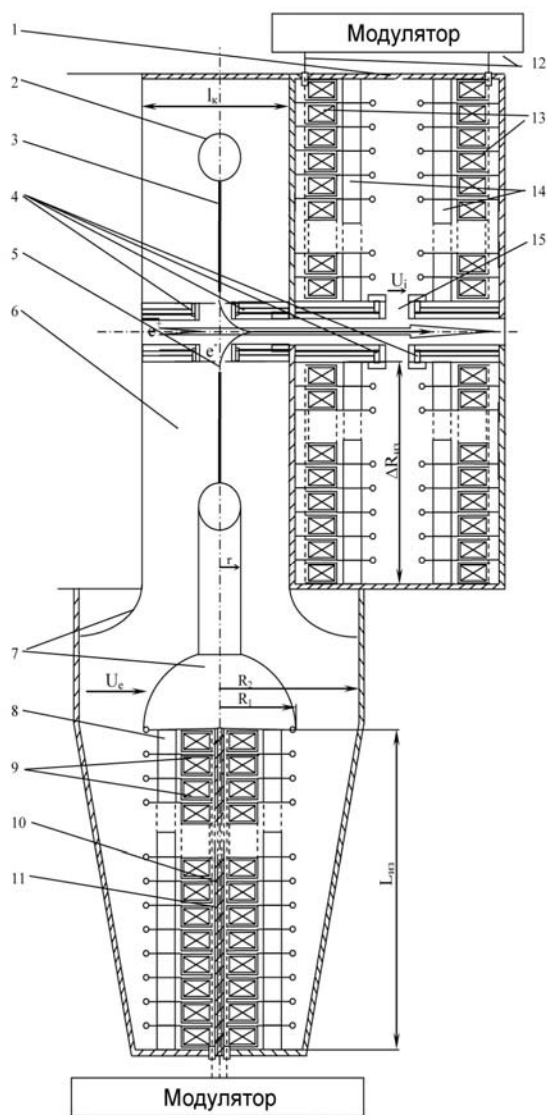
2. КОНСТРУКЦИЯ СЕКЦИИ ЛИУ ЗАРЯДОВО-КОМПЕНСИРОВАННЫХ ИОННЫХ ПУЧКОВ

На рисунке представлена разрабатываемая конструкция секции ЛИУ зарядово-компенсированных ионных пучков.

Особенностью ускорения СИП в линейном индукционном ускорителе является необходимость инжекции электронов в канал дрейфа ионов после каждого ускоряющего зазора для компенсации ку-

лоновских полей ионного пучка перед прохождением им последующего ускоряющего зазора. Это осуществляется с помощью инжектора электронов (компенсатора), представляющего собой отдельную индукционную секцию, нагруженную на ножевой автоэмиссионный катод 3. Для обеспечения надежного прохождения пучком электронов ускоряющего зазора секции, ускоряющей ионы, энергия электронного пучка выбирается большей приращения энергии ионного пучка на следующем ускоряющем зазоре на величину, определяемую энергетическим разбросом электронного пучка. В ускоряющем зазоре ионного ускорителя полем ускоряются только положительные частицы. Электроны, летящие параллельно ионному пучку, тормозятся в зазоре и их кинетическая энергия преобразуется в энергию электромагнитного поля (происходит рекуперация их энергии). Поскольку эту же энергию отбирает у секции ускоряемый пучок ионов, получается, что ускоряющая секция ионного ускорителя может работать на холостом ходу. Это выполняется при равенстве по модулю значений тока электронного и ионного пучков. При этом приращение энергии, приобретаемое ионным пучком в ускоряющем зазоре ускорителя, определяется энергией, отобранной от электронного пучка.

Особенность разрабатываемой конструкции, отличающая её от классических крупносекционированных секций индукционных ускорителей, заключается в том, что компенсатор выполнен в виде модуля ЛИУ с вакуумной высоковольтной изоляцией, обращенной на внешний радиус индукционной системы. Это позволяет получить наибольшее ускоряющее напряжение секции при наименьших радиальных размерах индукторов, что способствует удешевлению конструкции и снижению потерь в индукционной системе компенсатора. Секция, ускоряющая ионы, выполнена с индукционной системой, секционированной по радиусу. Это выгодно с точки зрения повышения темпа ускорения, так как при этом минимизируется длина секции.



Упрощенная компоновочная схема секции ЛИУ зарядово-компенсированных ионных пучков:

- 1 – корпус ускорителя; 2 – экран лезвийного катода; 3 – лезвийный автоэмиссионный катод; 4 – спиральные и соленоидальные фокусирующие катушки, встроенные в центральные электроды; 5 – ускоряющий зазор компенсатора; 6 – область вакуума; 7 – электростатические экраны; 8 – цилиндрический вакуумный изолятор с градиентными кольцами; 9 – индукторы компенсатора; 10 – центральный армирующий элемент; 11 – энергопроводы питания индукционной системы компенсатора; 12 – энергопроводы питания индукционной системы секции, ускоряющей ионы; 13 – индукторы ускорителя ионов; 14 – плоский вакуумный изолятор с градиентными кольцами; 15 – ускоряющий зазор секции, ускоряющей ионы

В дрейфовые трубки секции встроены фокусирующие спиральные и соленоидальные катушки, создающие касповую геометрию магнитного поля в области ускоряющего зазора компенсатора и секции, ускоряющей ионы. Касповая геометрия в области ножевого катода компенсатора нужна для поворота пучка электронов по направлению движения ионного пучка.

Для обеспечения тепловой устойчивости секции планируется использовать принудительное охлаждение индукционных систем циркулирующим трансформаторным маслом. Через индукционную систему компенсатора масло будет прокачиваться в щелевом зазоре между индукторами в радиальном направлении от оси системы, а в секции, ускоряющей ионы – в осевом направлении от торца секции к вакуумному изолятору.

Рассмотрим более подробно вопросы, касающиеся возможности повышения КПД, обеспечения электрической и механической прочности вакуумных изоляторов ускорителя и тепловой устойчивости индукционных систем.

3. КПД ИНДУКЦИОННОЙ СИСТЕМЫ СЕКЦИИ ЛИУ ЗАРЯДОВО-КОМПЕНСИРОВАННЫХ ИОННЫХ ПУЧКОВ

Поскольку в секции осуществляется передача энергии от электронного пучка к ионному, при расчете КПД целесообразно говорить об общем КПД ускорительной пары «ускоритель ионов – компенсатор», поскольку они в этом случае представляют собой единую систему. Выражение для КПД в этом случае имеет вид [3]:

$$\eta_{\Sigma} = \frac{W_i}{W_e + W_{ei} + W_{\mu e} + W_{\mu i}} \quad (1)$$

Здесь $W_{\mu e}$, $W_{\mu i}$ – потери за импульс на перемагничивание индукционной системы компенсатора и секции, ускоряющей ионы, соответственно; $W_i = U_i I_i \tau$ – энергия, переданная пучку ионов за импульс; $W_e = U_e I_e \tau$ – энергозатратность компенсатора в электронный пучок за импульс; $W_{ei} = U_i (I_i - I_e) \tau$ – энергия, отобранная электронно-ионным пучком за импульс от секции, ускоряющей ионы. В этих выражениях I_e , U_e , I_i , U_i – модули величин тока электронного пучка, ускоряющего напряжения компенсатора, тока ионного пучка и напряжения секции, ускоряющей ионы, соответственно. Эти выражения справедливы для прямоугольной формы ускоряющего импульса напряжением длительностью τ .

Из (1) следует очевидный факт, что КПД ускорительной пары будет тем большим, чем меньшими будут потери на перемагничивание её индукционных систем ($W_{\mu e}$ и $W_{\mu i}$). Потери на перемагничивание индукционной системы секции ЛИУ в общем случае определяются как

$$W_{\mu} = V \omega_{\mu} = \pi \cdot d \cdot K_{\zeta} \cdot S \cdot n \cdot \omega_{\mu} \quad (2)$$

где V – объем ферромагнетика в индукционной системе; d – её средний диаметр; K_{ζ} – коэффициент заполнения сердечников индукторов ферромагнетиком; S – площадь поперечного сечения сердечника индуктора; n – количество индукторов; ω_{μ} – энергия, теряемая за импульс в единице объема ферромагнетика, которая может быть определена на основе теории импульсного перемагничивания [4]:

$$\omega_{\mu} = 2B_s H_0 \lambda + (2B_s / \tau) (S_{\omega 0} \lambda^2 + S_{\omega e} \lambda^3) \quad (3)$$

Здесь H_0 – поле старта; B_s – индукция насыщения; $S_{\omega 0}$, $S_{\omega e}$ – коэффициенты переключения, учитываю-

шие потери на магнитную вязкость и вихревые токи, соответственно. Эти величины являются характеристиками магнитного материала [4,5]. $\lambda = \Delta B / 2B_s$ – относительное приращение индукции за импульс. Площадь S определяется как

$$S = U \cdot \tau / (2B_s \cdot \lambda \cdot n \cdot K_3). \quad (4)$$

Из (2) и (3) видно, что снизить потери на перемагничивание возможно за счет уменьшения объема ферромагнетика индукционной системы, что, в свою очередь, осуществимо за счет изготовления секций s как можно меньшими радиальными размерами.

4. ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ ВАКУУМНОЙ ИЗОЛЯЦИИ

В результате обзора существующих материалов, применяемых в вакуумной изоляции и в электротехнике в целом, в качестве материала изоляторов была взята корундовая керамика (Al_2O_3) (её диэлектрическая проницаемость $\epsilon = 8$, пробивная напряженность электрического поля 50 МВ/м). Этот материал обладает значительно более высокой нагревостойкостью по сравнению с полимерными материалами, не подвержен электрическому и радиационному старению, механически прочен, стабилен в размерах в широком диапазоне температур и позволяет получить высокий вакуум.

Ввиду того, что вакуумная поверхностная электрическая прочность ($E_{пр.п.} = 7$ МВ/м [6]) значительно ниже прочности по объему изолятора – она является основным фактором, ограничивающим его электрическую прочность. При однородном распределении поля по поверхности изолятора длина его изоляционной части может быть определена следующим образом:

$$L = UK_{з.пр.} / E_{пр.п.} \quad (5)$$

Здесь $K_{з.пр.}$ – коэффициент запаса электрической прочности изолятора. За счет наличия в изоляторе градиентных колец его суммарная длина составит $L_{из} = L \cdot K_1$, где $K_1 = (\Delta_1 + \Delta_2) / \Delta_1$ (здесь Δ_1 – расстояние между пластинами градиентных электродов. Δ_2 – толщина пластины градиентного электрода); Δ_1 задается из условия обеспечения возможности размещения между градиентными электродами индукторов и исходя из технологической простоты изготовления изолятора. Δ_2 задается требованиями к механической прочности градиентных электродов. Следует отметить, что между двумя соседними градиентными электродами как в компенсаторе, так и в секции, ускоряющей ионы, может размещаться не один, а несколько индукторов. Коэффициент запаса электрической прочности задается исходя из максимально возможного перенапряжения в системе, и определяется как $K_{з.пр.} = 1,2 \cdot K_{п.н.} = 2,4$. Максимально возможное перенапряжение зависит от схемы питания ускорителя. В нашем случае индукторы будут питаться от энергопроводов, имеющих с ними согласованное волновое сопротивление. Поскольку индукционная система компенсатора проектируется на КПД, близкий к 1, предельно возможный коэффициент перенапряжения в этом случае составит $K_{п.н.} = 2$. Перенапряжение в системе может появиться

при величине тока электронного пучка меньше номинального (например, из-за ухудшения эмиссионных свойств катода).

Для устранения краевого эффекта и повышения электрической прочности на краях градиентных электродов можно разместить металлические трубки, радиус которых можно определить из условия минимизации напряженности поля в системе электродов, состоящей из двух параллельных цилиндров: $r_T = h / 5,84$ (здесь h – расстояние между центрами трубок). При этом напряженность поля между соседними трубками будет больше напряженности поля по поверхности изолятора в 2,4 раза, что обычно не велико по сравнению с напряженностью поля, при которой начинается пробой между электродами в вакууме в диапазоне длительностей импульсов, характерных для ЛИУ ($E_{пр.в.} = 50$ МВ/м) [7]. Электрическая прочность трансформаторного масла будет также достаточна, поскольку она значительно больше поверхностной прочности изолятора в вакууме ($E_{пр.м.} = 20$ МВ/м при 50 Гц для чистого масла, а в наносекундном диапазоне больше этого значения до 6 раз [6]).

Известно, что максимальная напряженность поля в системе двух электродов, состоящих из концентрически расположенных цилиндров, находится на поверхности электрода с меньшим радиусом. Приравнивая её к максимально допустимой напряженности на поверхности металла в вакууме, $E_{доп.в.} = E_{пр.в.} / K_{з.пр.} = 20,8$ МВ/м, можно записать $E_{доп.в.} = U_e / (R_1 \cdot \ln(R_2 / R_1))$. Здесь R_1 – внешний радиус градиентного электрода; R_2 – внутренний радиус корпуса компенсатора (см. рисунок). Отсюда можно выразить R_2 :

$$R_2 = R_1 \cdot \exp(U_e / (R_1 \cdot E_{доп.в.})) \quad (6)$$

Такой подход достаточно точно позволяет определить оптимальные радиальные размеры корпуса компенсатора при заданном неизменном габарите R_1 и области, более близкой к «земле», где напряжение между градиентными электродами и корпусом меньше U_e . Аналогичным образом можно определить длину вакуумной камеры l_k и радиальный размер тороидального и цилиндрического экранов ножевого катода g . Поскольку оптимальное отношение внешнего к внутреннему радиусу концентрических цилиндров (при котором напряженность поля в системе минимальна) равно $e \approx 2,7$, радиус экрана g целесообразно задать равным $g = U_e / E_{доп.в.}$, а длину камеры $l_k = 2g \cdot e$. Расстояние между центром тороидального экрана ножевого катода и стенкой вакуумной камеры целесообразно задать равным $l_k / 2$. Расстояние между ускоряющими электродами секции, ускоряющей ионы, считая поле однородным, можно задать как $l_{з.и} = U_i / E_{доп.в.}$.

Следует отметить, что после аналитического расчета должен производиться численный расчет поля разрабатываемой конструкции, чтобы выявить возможное наличие слабых мест и провести при необходимости окончательную оптимизацию элементов.

5. ОБЕСПЕЧЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ ВАКУУМНЫХ ИЗОЛЯТОРОВ

Анализ механической прочности вакуумных изоляторов секции, ускоряющей ионы, и компенсатора показывает, что их градиентные электроды целесообразно использовать как дополнительные армирующие элементы. Для механической разгрузки изоляторов секции, ускоряющей ионы, градиентные электроды должны иметь жесткое крепление с торцевой металлической стенкой корпуса, при этом их можно задействовать для механической фиксации остальных элементов секции (индукторов, энергопроводов и трубок, подводящих и отводящих охлаждающее масло). Минимально допустимая толщина пластины градиентного электрода может быть определена следующим образом:

$$\Delta_2 = \frac{\hat{E}_{\varphi,i} \cdot (pS_i + m_i g)}{\sigma_o n_{ye} \pi d_m \hat{E}_{i\partial a}} \quad (7)$$

Здесь $K_{з.м.} = 1,6$ – коэффициент запаса механической прочности; p – давление, воздействующее на изолятор; S_i – площадь изолятора; m_i – масса всех элементов полусекции, несомых градиентными электродами; g – ускорение свободного падения; σ_t – механическое напряжение текучести металла; $n_{эл}$ – количество градиентных электродов; $d_{ср}$ – средний диаметр изолятора; $K_{отв} = 0,2$ – коэффициент, учитывающий уменьшение сечения несущих пластин вследствие наличия в них сквозных отверстий, необходимых для размещения в секции энергопроводов и трубок, подводящих и отводящих охлаждающее масло.

Другим фактором, важным с точки зрения обеспечения механической прочности вакуумного изолятора секции, ускоряющей ионы, является механическая прочность мест склеивания сегментов изолятора с градиентными электродами. Растягивающее механическое усилие в месте склеивания можно определить как

$$\sigma_o = (p\Delta_1 / \Delta_3 + \rho\Delta_1 g) / 2 \quad (8)$$

Здесь Δ_3 – толщина вакуумного изолятора; ρ – плотность материала изолятора. Δ_3 выбирается из условия технологической простоты изготовления сегментов, обеспечения механической прочности изолятора с точки зрения перепада давления и из условия обеспечения адгезионной прочности мест склеивания сегментов изолятора с электродами ($\sigma_p \leq \sigma_a / K_{з.м.}$). Расчеты показывают, что при использовании связи на основе органического термореактивного связующего ($\sigma_a = 10 \text{ МН/м}^2$ [10]) при толщине плоского изолятора 40 мм и соизмеримой с этим размером радиальной ширине сегмента Δ_1 обеспечивается достаточная механическая прочность конструкции.

Анализ механической прочности вакуумного изолятора компенсатора показывает, что для обеспечения его механической прочности целесообразно использовать градиентные электроды, жестко прикрепленные к центральному армирующему элементу 10 (см. рисунок). Этот элемент выполняет также роль токопровода вторичного контура компенсатора. На нём целесообразно закрепить также индукто-

ры и другие элементы секции. Он может быть трубчатым или стержневым. Его минимально допустимое поперечное сечение может быть определено следующим образом:

$$S_a = \frac{p \cdot S_{\kappa} + m_{\kappa} \cdot g}{\sigma_o / \hat{E}_{\varphi,i}} \quad (9)$$

Здесь S_{κ} – поперечная площадь внутреннего пространства секции компенсатора; m_{κ} – масса всех элементов секции компенсатора.

Расчеты показывают, что для характерных в компенсаторе радиальных размеров керамического изолятора при радиальной толщине его сегментов порядка 40 мм и соизмеримой с этим размером их длине достигается достаточно высокая механическая прочность с точки зрения осевых механических усилий, перепада давления и адгезионной прочности мест склеивания сегментов изолятора с электродами.

6. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА СЕКЦИИ ЛИУ ЗАРЯДОВО-КОМПЕНСИРОВАННЫХ ИОННЫХ ПУЧКОВ

Был произведен расчет секции ускорителя ионов на ускоряющее напряжение $U_i = 3 \text{ МВ}$, ток пучка $I_i = I_c = 20 \text{ кА}$, темп ускорения 2 МэВ/м (взят на уровне темпа ускорения резонансных ускорителей тяжелых ионов), длительность ускоряющего импульса $\tau = 125 \text{ нс}$, среднюю мощность пучка ионов 100 кВт (частота посылок при этом составляет $f = 13,3 \text{ Гц}$). В качестве материала ферромагнетика был взят сплав 50 НП 10 мкм. Его параметры: $H_0 = 100 \text{ А/м}$, $S_{\omega 0} = 80 \text{ мкКл/м}$, $S_{\omega e} = 80 \text{ мкКл/м}$, $V_s = 1,4 \text{ Тл}$ [4]. Первичное напряжение на индукторах было принято равным $U_1 = 50 \text{ кВ}$, ускоряющее напряжение компенсатора $U_c = U_i + U_1 = 3,05 \text{ МВ}$. Количество индукторов в секции компенсатора при этом составило $n_c = U_c / U_1 = 61$, а в секции, ускоряющей ионы, $n_i = U_i / U_1 = 60$. Минимально допустимая длина изолятора составила $L = 1,04 \text{ м}$. Радиус экрана лезвийного катода при этом составил $r = 146 \text{ мм}$, длина вакуумной камеры компенсатора составила $l_k = 0,79 \text{ м}$. При принятом коэффициенте заполнения сердечников $K_3 = 0,6$ (взят из существующей конструкции), коэффициентах относительного приращения индукции за импульс, принятых равными $0,75$ для индукционной системы компенсатора и единице для секции ускорителя ионов, площадь поперечного сечения сердечника индуктора составила $0,005 \text{ м}^2$ для компенсатора и $0,0037 \text{ м}^2$ для секции, ускоряющей ионы. Зазор между индукторами в секциях был принят равным 5 мм , между сердечниками индукторов и изолятором – 10 мм . Расстояние между торцом секции, ускоряющей ионы, и сердечниками индукторов из конструкторских соображений было принято равным 7 см (исходя из возможности размещения энергопроводов и прочих элементов в секции). Расстояние между градиентными электродами секции, ускоряющей ионы, было взято равным $7,4 \text{ см}$. Длина ускорительного зазора секции ускорителя ионов составила $l_{3,i} = U_i / E_{\text{доп.в.}} = 144 \text{ мм}$. Длины частей центральных электродов, выступающих из изолятора в вакуумную камеру секции ионов, были приняты равными 5 см , радиус центрального электрода (он же наименьший радиус индукционной

системы ускорителя ионов) был принят равным 200 мм (размеры взяты из существующей конструкции). Из условия обеспечения темпа ускорения 2 МэВ/м осевые длины сердечников индукторов секции, ускоряющей ионы, были приняты равными 12 см. При этом суммарная длина секции (вместе с длиной вакуумной камеры компенсатора) составила 1,5 м. Радиальная толщина индукторов секции ускорителя ионов, определенная исходя из рассчитанной площади сердечника и принятой длины, составила 3 см, внешний радиус индукционной системы составил 1,354 м, радиальный размер вакуумного изолятора $\Delta R_{\text{из}} = 1,154$ м, вес всех элементов полусекции ускорителя ионов $m_c \approx 4,5$ тонны. Количество градиентных электродов в полусекции ускорителя ионов составило 14 (при этом между соседними электродами размещено по два индуктора). Толщина пластин градиентных электродов из нержавеющей стали ($\sigma_t = 285$ МПа) была принята равной 2 мм в секции ускорителя ионов и в компенсаторе.

Внутренний радиус сердечников компенсатора из конструкторских соображений был принят равным 100 мм, наружный – 200 мм. Ширина сердечников индукторов, определённая исходя из известной его площади, при этом составила 0,05 м.

Радиальная толщина сегмента изолятора была принята равной 40 мм, длина 115 мм (между соседними градиентными электродами при этом размещено по 2 индуктора). Внешний радиус градиентного электрода R_1 был принят равным 310 мм. Радиус корпуса компенсатора R_2 при этом составил 497 мм. Вес элементов секции компенсатора составил $m_k \approx 2,5$ тонны. Поперечная площадь армирующего элемента из нержавеющей стали составила $S_a = 2,15$ см², длина цилиндрического изолятора – 3,57 м. Масса ферромагнетика в индукционной системе компенсатора составила 1348 кг, а в индукционной системе ионного ускорителя – 3070 кг.

Удельные потери в ферромагнетике составили для индукторов компенсатора 1974 Дж/м³, а для секции, ускоряющей ионы – 3864 Дж/м³. Потери на перемагничивание в индукционной системе за импульс для компенсатора составили $W_{\text{мк}} = 309$ Дж, а в секции ускорителя ионов $W_{\text{ми}} = 2758$ Дж. Средняя мощность потерь в индукционной системе компенсатора составила 4126 Вт, а в секции ускорителя ионов – 36780 Вт. КПД компенсатора относительно энергии, переданной пучку электронов, составил $\eta_k = W_e / (W_e + W_{\text{мк}}) = 0,96$, а общий КПД индукционной системы ускорительной пары составил $\eta_{\Sigma} = 0,7$.

Для оценки возможности обеспечения тепловой устойчивости секции был произведен тепловой расчет индукционных систем компенсатора и секции, ускоряющей ионы. Расчет основывался на следующих допущениях:

- тепловыделение в системе считалось непрерывным процессом;
- не учитывалась нестационарность на входных участках как гидродинамическая, так и тепловая;
- стенки щелевого канала считались гладкими;
- считалось, что теплоотдача от индукторов в масло осуществлялась только в щелевом зазоре;
- тепловое сопротивление ферромагнитного сердечника ввиду его малости не учитывалось;

– полагалось, что все сердечники в ускорителе имеют слой органической изоляции с терморезистивным связующим толщиной 1,5 мм и теплопроводностью 0,38 Вт/(м·К);

– максимально допустимая температура в изоляции и в масле была принята 80°C.

Целью теплового расчета являлось определение минимально допустимой скорости движения масла в зазоре, при которой температура в изоляции и в масле не превысит максимально допустимых значений. Расчет осуществлялся методом последовательных приближений с использованием критериальных уравнений для щелевого канала [9]. Результат расчета показал, что тепловой баланс между выделяемым в индукционной системе и отводимым маслом выполняется при весьма малых скоростях масла в каналах, соответствующих вязкостному течению. Это обусловлено большой суммарной площадью поперечного сечения каналов и боковых поверхностей индукторов. Массовый расход масла на охлаждение индукционной системы полусекции ускорителя ионов составил 0,3 кг/с, а индукционной системы компенсатора 0,072 кг/с. Перепад температуры в изоляции сердечников индукторов секции, ускоряющей ионы, при этом составил 2°C, а в компенсаторе 1,4°C. Температура масла на входе в канал была принята 35°C, а конечная температура масла на выходе из канала как в компенсаторе, так и в ускорителе ионов составила примерно 77°C. Результаты расчета показали техническую возможность обеспечения тепловой устойчивости при весьма незначительных скоростях масла, однако во избежание локальных перегревов, обусловленных разными скоростями движения масла в щелевом канале вследствие естественной конвекции и того, что оно будет подаваться в систему через трубки, нужны эмпирические исследования и соответствующие расчеты на их основе. Возможно, будет целесообразна интенсификация теплоотдачи через увеличение скорости прокачки масла и создание направляющих каналов для более равномерного распределения скорости движения масла в каналах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Создание секции сильноточного линейного индукционного ускорителя зарядово-компенсированных ионных пучков с высоким темпом ускорения (на уровне 2 МэВ/м) и большой средней мощностью пучка является с точки зрения тепловой устойчивости секции, механической и электрической прочности её элементов технически реализуемой задачей. Дальнейшей задачей в данном направлении, помимо более тщательной проработки элементов, является разработка мощного импульсного модулятора, который обеспечит формирование требуемой формы импульса ускоряющего напряжения в секции. Для этого потребуются тщательный учет паразитных параметров, присутствующих в схеме ускорителя (индуктивностей рассеяния в первичном и вторичном контурах ЛИУ, нелинейного характера перемагничивания сердечников, наличие паразитных емкостей и т.д.).

ЛИТЕРАТУРА

1. О.В. Батищев, В.И. Голота, В.И. Карась и др. Линейный индукционный ускоритель зарядово-компенсированных ионных пучков для инерциального термоядерного УТС // *Физика плазмы*. 1993, т.19, № 5, с.611-644.
2. В.И. Карась, В.И. Голота, В.А. Кияшко и др. Исследования линейного индукционного ускорителя зарядово-компенсированных ионных пучков для инерциального УТС // *Проблемы теоретической физики*. Київ: «Наукова думка». 1991, с.165-180.
3. А.Г. Гурин, Е.А. Корнилов, Р.С. Ложкин. Коэффициент полезного действия линейного индукционного ускорителя зарядово-компенсированных ионных пучков // *Вестник НТУ "ХПИ". "Электроэнергетика и преобразовательная техника"*. Харьков, 2006, в.34, с.66-73.
4. Ю.П. Вахрушин, А.И. Анацкий. *Линейные индукционные ускорители*. М.: «Атомиздат», 1978.
5. А.И. Пирогов, Ю.М. Шамаев. *Магнитные сердечники в автоматике и вычислительной технике*. М.: «Энергия», 1967.
6. Е.А. Абрамян, Б.А. Альтеркоп, Г.Д. Кулешов. *Интенсивные электронные пучки. Физика. Техника. Применение*. М.: «Энергоатомиздат», 1984.
7. Е.А. Абрамян. *Промышленные ускорители электронов*. М.: «Энергоатомиздат», 1986.
8. В.И. Феодосьев. *Сопротивление материалов*. М.: «Гос. изд-во физико-математической лит-ры», 1962.
9. В.М. Капинос. *Процессы теплообмена в примерах и задачах: Учеб. пособие*. Харьков: «НТУ ХПИ», 2007.
10. Л.Д. Гинзбург. *Высоковольтные трансформаторы и дроссели с эпоксидной изоляцией*. Л.: «Энергия», 1987.

Статья поступила в редакцию 18.09.2009 г.

ELEMENTS OF SECTION OF THE HIGH-CURRENT LINEAR INDUCTION ACCELERATOR OF CHARGE-COMPENSATING ION BEAMS WITH THE RAISED POWER CHARACTERISTICS

A.G. Gurin, E.A. Kornilov, R.S. Lozhkin

The method of account of basic elements of section of the high-current linear induction accelerator of charge-compensating ion beams, optimized with the purpose of reception of the greatest efficiency, rate of acceleration and average capacity of a beam is submitted. The opportunity of creation section on average capacity of a beam 100 kW at efficiency of induction system at a level 0,7, current of a beam in a pulse 20 kA, rate of acceleration 2 MeV/m, duration of an accelerating pulse 125 ns, frequency of shots 13,3 Hz, meaning of an accelerating voltage 3 MV, is shown.

ЕЛЕМЕНТИ СЕКЦІЇ ПОТУЖНОСТРУМОВОГО ЛІНІЙНОГО ІНДУКЦІЙНОГО ПРИСКОРЮВАЧА ЗАРЯДОВО-КОМПЕНСОВАНИХ ІОННИХ ПУЧКІВ З ПІДВИЩЕНИМИ ЕНЕРГЕТИЧНИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

A.G. Gurin, E.O. Kornilov, R.S. Lozhkin

Представлено метод розрахунку основних елементів секції потужнострумового лінійного індукційного прискорювача зарядово-компенсованих іонних пучків, оптимізованих з метою отримання найбільшого ККД, темпу прискорення й середньої потужності пучка. Показана можливість створення секції на середню потужність пучка 100 кВт при ККД індукційної системи на рівні 0,7, струмі пучка в імпульсі 20 кА, темпі прискорення 2 МеВ/м, тривалості прискорювального імпульсу 125 нс, частоті посилянь 13,3 Гц, значенні прискорювальної напруги 3 МВ.