

АНАЛИЗ РЕГУЛЯРНЫХ УСКОРЯЮЩИХ СТРУКТУР ЛИНЕЙНОГО УСКОРИТЕЛЯ ИНЖЕКТОРА СИБИРСКОГО КОЛЬЦЕВОГО ИСТОЧНИКА ФОТОНОВ

*К. А. Гришина^{a, б, 1}, А. В. Андрианов^{a, в}, М. В. Арсентьева^{a, в},
А. М. Барняков^a, А. Е. Левичев^{a, в}, И. Л. Пивоваров^a, С. Л. Самойлов^a*

^a Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

^б Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия

^в Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

В работе представлен анализ необходимых точностей изготовления, начальных параметров пучка и особенностей продольной и поперечной динамики в ускоряющей структуре на основе диафрагмированного волновода, производимой в Институте ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН. На основе данных об ускоряющей структуре предполагается создание линейного ускорителя инжектора сибирского кольцевого источника фотонов. Анализ проведен с учетом технического задания инжектора источника фотонов.

The paper presents an analysis of the required manufacturing accuracy, the initial parameters of the beam and the features of the longitudinal and transverse dynamics in an accelerating structure based on a diaphragm waveguide produced at the Budker Institute of Nuclear Physics of SB RAS. Based on the accelerating structure data, it is proposed to create a linear accelerator for the injector of the Siberian Ring Photon Source. The analysis was carried out taking into account the technical specifications of the photon source injector.

PACS: 29.17.+Bt

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в Новосибирске принят к реализации проект по созданию современного источника синхротронного излучения — сибирского кольцевого источника фотонов (СКИФ) [7]. Предполагается, что основное кольцо источника будет иметь энергию электронов 3 ГэВ с эмиттансом около 60 пм. Для этих целей в качестве инжектора планируется использовать линейный ускоритель электронов и бустерный накопитель. В табл. 1 приведены основные параметры инжекционного комплекса, а в табл. 2 — основные параметры линейного ускорителя.

Линейный ускоритель с энергией в области 200 МэВ будет состоять из регулярных ускоряющих структур с частотой ускоряющего поля 2856 МГц. Будут использованы

¹ E-mail: Grishinakristina21@gmail.com

Таблица 1. Основные параметры инжекционного комплекса

Параметр	Значение
Рабочая энергия инжекции в основное кольцо, ГэВ	3
Максимальная энергия инжекции, ГэВ	3,15
Частота инжекции в накопитель, Гц	1
Время между сгустками, нс	5,6
Количество сгустков электронов в пучке	До 55
Заряд в одном сгустке, нКл	До 0,24
Максимальный заряд в пучке, нКл	13
Время заполнения накопителя электронов от 0 до 400 мА, мин	≤ 1
Эффективность транспорта заряда от пушки до накопителя, %	≥ 90
Горизонтальный эмиттанс при 3 ГэВ, нм · рад	< 40
Разброс по энергии, %	$< 0,1$
Время незапланированных остановок в год, %	$\leq 0,5$

Таблица 2. Основные параметры линейного ускорителя

Параметр	Значение
Рабочая энергия электронов, МэВ	200
Максимальная энергия, МэВ	210
Частота выстрелов, Гц	1
Длина последовательностей сгустков, нс	До 310
Время между сгустками, нс	5,6
Количество сгустков электронов в пучке	До 55

трехметровые ускоряющие структуры на основе диафрагмированного волновода с бегущим типом волны с модой колебания $2\pi/3$ и постоянным импедансом [1]. Данный тип структур давно и успешно используется во многих ускорителях мира, в том числе и в Институте ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН (ИЯФ СО РАН) на инжекционном комплексе ВЭПП-5 [2]. Тем не менее для инжекционного комплекса СКИФ необходимы параметры пучка, сильно отличающиеся от параметров инжекционного комплекса ВЭПП-5. В данном случае предполагается работа, близкая к односгустковому режиму, поскольку временная задержка между пучками значительно превосходит период ускоряющего поля. При этом пучки должны обладать малым энергетическим разбросом, малым эмиттансом, значительным зарядом, а токопрохождение должно составлять не менее 90%. Кроме этого, стабильность параметров пучка также должна быть высокой. В связи с этим был проведен дополнительный анализ ускоряющих структур на основе диафрагмированного волновода, производимых в ИЯФ СО РАН. Определены параметры, необходимые для достижения заданного качества пучка, изучены краевые эффекты ускоряющего поля, влияющие на динамику частиц, выбраны оптимальные входные параметры пучка, необходимые для наилучшего прохождения и ускорения в ускоряющих структурах. Полученные результаты должны обеспечить дополнительную информацию при создании инжектора СКИФ, которая необходима для обеспечения заданных параметров пучка и стабильной работы.

1. ТРЕБОВАНИЯ НА РАЗМЕР ПУЧКА И ТОЧНОСТИ ВИДА КОЛЕБАНИЯ УСКОРЯЮЩЕЙ СТРУКТУРЫ

Вид ускоряющей структуры на основе диафрагмированного волновода, изготавливаемой в ИЯФ СО РАН для инжекционного комплекса ВЭПП-5, представлен на рис. 1.

Основные параметры структур, которые были получены ранее при создании инжекционного комплекса ВЭПП-5, приведены в табл. 3 [2].

Инжекционный комплекс ВЭПП-5 служит для получения и накопления интенсивного пучка электронов и позитронов. Первый пучок получается с помощью электронной пушки с термоэмиссионным катодом с напряжением 200 кэВ, длительностью 2–8 нс и током 2–8 А [4]. Позитронный пучок генерируется в конверсионной мишени. В обоих режимах длительность пучка значительно больше длительности периода ускоряющего поля. При этом частицы сами формируются в сгустки под действием ускоряющей и замедляющей полуволн электрического поля, что приводит к доста-

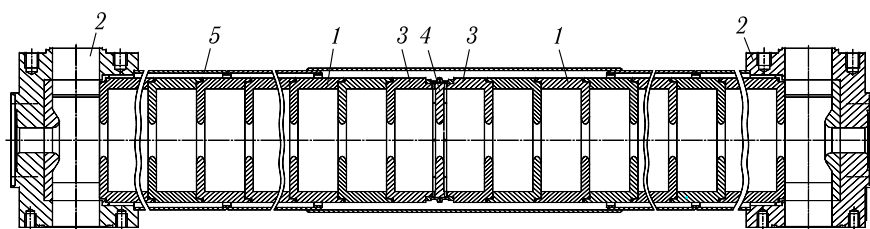


Рис. 1. Ускоряющая структура типа «диафрагмированный волновод»: 1 — регулярная ускоряющая ячейка; 2 — трансформатор типа волны; 3 — переходная (соединительная) ускоряющая ячейка; 4 — соединительная диафрагма; 5 — рубашка охлаждения

Таблица 3. Параметры ускоряющей структуры типа диафрагмированный волновод, производимой в ИЯФ СО РАН

Параметр	Значение
Рабочая частота, МГц	2855,5
Рабочий вид колебаний	$2\pi/3$
Собственная добротность	$1,3 \cdot 10^4$
Период, мм	34,99
Внутренний диаметр резонатора, мм	83,75
Диаметр отверстия диафрагмы, мм	25,9
Толщина диафрагмы, мм	6
Длина, м	2,93
Количество ускоряющих ячеек с двумя трансформаторами типа волны	85
Фазовая скорость (c — скорость света в вакууме)	$1c$
Групповая скорость (c — скорость света в вакууме)	$0,021c$
Шунтовое сопротивление, МОм/м	51
Коэффициент затухания по полю, m^{-1}	0,108
Время заполнения структуры, мкс	0,456

точно большому энергетическому разбросу и низкому коэффициенту захвата частиц в режим ускорения. В этом случае производить тонкую настройку и оптимизацию ускоряющих ячеек структур после их изготовления не имеет смысла. В первую очередь представляют интерес средние параметры ускоряющих структур, такие как средний градиент ускорения или шунтовое сопротивление.

Для инжекционного комплекса СКИФ необходимо работать с отдельными сгустками частиц, обеспечивая малый энергетический разброс и высокий коэффициент захвата в режиме ускорения. В этом случае на качество пучка могут существенным образом влиять внутренние ошибки изготовления ускоряющих ячеек, которые приводят к ошибкам в фазовом набеге на период ускоряющей структуры.

В ускоряющей структуре на основе диафрагмированного волновода с постоянным импедансом энергию в электронвольтах, приобретаемую пучком при пролете длины L , можно найти согласно выражению [5]:

$$U = U_0 \frac{1 - e^{-\alpha L}}{\sqrt{\alpha L}}.$$

Здесь не учитывается нагрузка током пучка, а $U_0 = \sqrt{2P_0 R_{sh} L}$, где P_0 — мощность генератора, R_{sh} — шунтовое сопротивление структуры на единицу длины. С учетом параметров, представленных в табл. 3, для структур, изготавливаемых в ИЯФ СО РАН, получаем

$$U = 8336 \sqrt{P_0}. \quad (1)$$

Таким образом, если использовать пять ускоряющих секций для достижения энергии 210 МэВ, то достаточно мощности генератора $P_0 = 25$ МВт для одной секции. Такую мощность можно получить, используя, например, один клистрон с пиковой мощностью 50 МВт на две ускоряющие секции. В этом случае понадобятся три клистрона, два из которых будут питать в сумме четыре структуры, а один клистрон сможет всю свою мощность отдавать одной секции. В итоге можно получить энергию пучка в области 225 МэВ, что обеспечивает превышение энергии по отношению к минимальной требуемой на 12,5%.

Пусть для пучка, пролетающего по оси ускоряющей структуры на основе диафрагмированного волновода, выполняется равенство фазовой скорости волны n -й пространственной гармоники v_{np} и продольной скорости движения частиц v_e . Будем считать, что волна распространяется вдоль оси z , а распределение амплитуды электрического поля вдоль оси ускоряющих ячеек постоянно на их длине. Пусть равновесная частица пучка влетает в ускоряющую структуру с начальной фазой влета φ_0 , а сам пучок имеет длительность $2\Delta\varphi$. С учетом этого запишем энергию, которую приобретает крайняя частица пучка, отличающаяся от равновесной на фазу $\Delta\varphi$ при пролете длины L [3]:

$$W = \int_0^L e E_n \cos(\omega t - \beta_n z + \varphi_0 + \Delta\varphi) dz. \quad (2)$$

Здесь e — заряд электрона; E_n — амплитуда n -й пространственной гармоники; ω — частота ускоряющего поля; β_n — волновое число n -й пространственной гармоники;

t — время движения частицы, которое можно записать в виде $t = z/v_e$. Кроме того, по определению $\omega = \beta_n v_{np}$, таким образом, перепишем выражение (2) как

$$W = \int_0^L eE_n \cos \left[\left(\frac{v_{np}}{v_e} - 1 \right) \beta_n z + \varphi_0 + \Delta\varphi \right] dz.$$

Из разложения ряда Фурье для амплитуды n -й пространственной гармоники имеем

$$E_n = \frac{1}{d} \left| \int_{-d/2}^{d/2} E_0 e^{i\beta_n z} dz \right| = E_0 \frac{\sin(\theta_n/2)}{\theta_n/2}, \quad (3)$$

где E_0 — амплитуда электрического поля на периоде ускоряющей ячейки (считаем постоянной); $\theta_n = \beta_n d$ — сдвиг фазы на ячейку n -й пространственной гармоники (рабочий вид колебания); d — период ускоряющей структуры.

Как говорилось ранее, считаем, что скорость частиц в пучке равна фазовой скорости n -й пространственной гармоники, тогда

$$W = \int_0^L eE_n \cos(\varphi_0 + \Delta\varphi) dz. \quad (4)$$

Если считать, что амплитуда электрического поля на периоде ускоряющей ячейки постоянна, интеграл (4) можно вычислить:

$$W = eE_n L \cos(\varphi_0 + \Delta\varphi) \quad (5)$$

или

$$W = eLE_0 \frac{\sin(\theta_n/2)}{\theta_n/2} \cos(\varphi_0 + \Delta\varphi).$$

В дальнейшем будем обозначать рабочий вид колебания $\theta_n = \beta_n d$ без индекса n , т. е. $\theta = \beta d$:

$$W = eLE_0 \frac{\sin(\theta/2)}{\theta/2} \cos(\varphi_0 + \Delta\varphi). \quad (6)$$

Для достижения максимальной энергии фаза равновесной частицы, определяемая начальными условиями влета пучка, должна быть равной $\varphi_0 = 0$. Тогда по отношению к равновесной частице крайняя частица будет иметь уменьшенное значение энергии на величину

$$\delta w = 1 - \cos(\Delta\varphi). \quad (7)$$

При энергетическом разбросе в пучке $\delta w = 1\%$ получаем, что длина пучка не должна превышать

$$2\Delta\varphi = 16^\circ. \quad (8)$$

Таким образом, при отсутствии каких-либо ошибок в работе и конструкции ускорителя для достижения энергетического разброса в инжекторе СКИФ необходима длительность пучка не более 16° или 4,6 мм.

Допустим теперь, что пучок имеет точечный размер $\Delta\varphi = 0$ и $\varphi_0 = 0$, а вследствие, например, ошибок изготовления сдвиг рабочей фазы в ячейке отличается от заданной на малую величину $|\Delta\theta| \ll 1$:

$$\theta = \theta_0 + \Delta\theta. \quad (9)$$

В этом случае

$$\sin\left(\frac{\theta}{2}\right) = \sin\left(\frac{\theta_0 + \Delta\theta}{2}\right) \approx \sin\left(\frac{\theta_0}{2}\right) + \frac{\Delta\theta}{2} \cos\left(\frac{\theta_0}{2}\right),$$

$$\frac{1}{\theta/2} \approx \frac{1}{\theta_0/2} \left(1 - \frac{\Delta\theta}{\theta_0}\right),$$

а

$$\frac{\sin(\theta/2)}{\theta/2} \approx \frac{\sin(\theta_0/2)}{\theta_0/2} \left(1 + \Delta\theta \left(\frac{1}{2 \operatorname{tg}(\theta_0/2)} - \frac{1}{\theta_0}\right)\right). \quad (10)$$

Здесь пренебрегли малыми второго порядка. Таким образом, с учетом (6) можно записать:

$$W = W_{\max}(1 - \delta W), \quad (11)$$

$$\delta W = -\Delta\theta \left(\frac{1}{2 \operatorname{tg}(\theta_0/2)} - \frac{1}{\theta_0}\right), \quad (12)$$

где $W_{\max} = eLE_0 \frac{\sin(\theta_0/2)}{\theta_0/2}$.

Для ускоряющей структуры, работающей на моде колебания $\theta_0 = 2\pi/3$, выражение (12) можно упростить:

$$\delta W = 0,189\Delta\theta. \quad (13)$$

Для инжектора СКИФ согласно табл.2 предел изменения выходной энергии в пучке должен поддерживаться на уровне

$$\frac{\Delta W}{W_m} \approx 4,7\%. \quad (14)$$

Если в качестве регулярной ускоряющей структуры использовать диафрагмированный волновод с модой колебания $\theta_0 = 2\pi/3$, то при заданной входной мощности суммарное отклонение от рабочего вида колебания согласно (11) и (13) не должно превышать

$$\Delta\theta = 14^\circ. \quad (15)$$

В итоге получаем, что исходя из требования на энергетический разброс в пучке необходимо обеспечить размер ускоряемого пучка в регулярных ускоряющих структурах $\sigma_b = 4,6$ мм (см. (8)), а из требования конечной энергии — суммарную ошибку на сдвиг фазы: $\sigma_\theta = 14^\circ$ (см. (15)).

2. ОЦЕНКА ВАРИАЦИИ НАБЕГА ФАЗЫ ПО ИЗМЕНЕНИЮ РАДИУСА УСКОРЯЮЩИХ ЯЧЕЕК

Набег фазы в структуре равен $\theta = \beta d = (2\pi d)/\Lambda$, тогда вариация набега фазы будет

$$\Delta\theta = \Delta \left(\frac{2\pi d}{\Lambda} \right) = \theta \left(\frac{\Delta d}{d} - \frac{\Delta\Lambda}{\Lambda} \right). \quad (16)$$

Используя определение групповой скорости [5] $v_{\text{гр}} = \partial\omega/\partial\beta$, запишем:

$$\frac{v_{\text{гр}}}{c} = \beta_{\text{гр}} = \frac{1}{c} \frac{\partial\omega}{\partial\beta} = \frac{\partial(1/\lambda)}{\partial(1/\Lambda)} = \frac{\Lambda^2}{\lambda^2} \frac{\Delta\lambda}{\Delta\Lambda}.$$

С учетом выражения для нормированной фазовой скорости $\beta_p = v_p/c = \Lambda/\lambda$ получаем

$$\beta_{\text{гр}} = \beta_p^2 \frac{\Delta\lambda}{\Delta\Lambda} \quad (17)$$

или

$$\Delta\Lambda = \frac{\beta_p^2}{\beta_{\text{гр}}} \Delta\lambda. \quad (18)$$

Здесь учитывалось, что λ и $\Delta\lambda$ — длина волны в свободном пространстве и ее отклонение соответственно. Разделив (18) на Λ , учитывая, что $\Lambda = \beta_p \lambda$, получим

$$\frac{\Delta\Lambda}{\Lambda} = \frac{\beta_p}{\beta_{\text{гр}}} \frac{\Delta\lambda}{\lambda}. \quad (19)$$

Длина волны в свободном пространстве по определению равна $\lambda = c/f_0$ (f_0 — частота генератора), а значит, пропорциональна радиусу резонатора $\lambda \propto R$. Окончательно (19) можно записать (Δf — отклонение частоты ускоряющей ячейки):

$$\frac{\Delta\Lambda}{\Lambda} = \frac{\beta_p}{\beta_{\text{гр}}} \frac{\Delta R}{R} = \frac{\beta_p}{\beta_{\text{гр}}} \frac{\Delta f}{f_0}. \quad (20)$$

С учетом (20) получаем для отклонения фазы колебания в ускоряющей структуре на основе диафрагмированного волновода (16):

$$\frac{\Delta\theta}{\theta} = \frac{\Delta d}{d} - \frac{\beta_p}{\beta_{\text{гр}}} \frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta d}{d} + \frac{\beta_p}{\beta_{\text{гр}}} \frac{\Delta f}{f_0}. \quad (21)$$

Для ускоряющей структуры, производимой в ИЯФ СО РАН, с учетом табл. 3 имеем

$$\frac{\Delta\theta}{\Delta R} = -0,136^\circ/\text{мкм}, \quad (22)$$

$$\frac{\Delta\theta}{\Delta f} = 2^\circ/\text{МГц}, \quad (23)$$

$$\frac{\Delta\theta}{\Delta d} = 0,0034^\circ/\text{мкм}. \quad (24)$$

С учетом (15) отклонение в 14° достигается при эффективном суммарном изменении радиуса ускоряющих ячеек на 103 мкм или на 4,1 мм для периода. Видно, что

суммарная вариация периода не так существенна, как вариация радиуса изготовления ускоряющих ячеек.

Если говорить о частоте, то согласно (23) суммарная ее вариация должна составить не более 7 МГц. Согласно табл. 3 в одной ускоряющей структуре, производимой в ИЯФ СО РАН, 85 ускоряющих ячеек. Если использовать 5 таких структур, то для достижения суммарной вариации, связанной с частотой, необходимо обеспечить настройку ускоряющих ячеек с точностью 16 кГц, что соответствует точности радиуса ячеек 0,24 мкм (суммарная точность 103 мкм, деленная на количество ячеек у пяти структур). Достижение вышеуказанных механических точностей представляет собой достаточно трудную задачу, но подстройка частоты ускоряющих ячеек после их изготовления с точностью 16 кГц вполне возможна при наличии специально подготовленных мест на внешнем радиусе резонаторов.

3. ОЦЕНКА ВАРИАЦИИ НАБЕГА ФАЗЫ ПО ИЗМЕНЕНИЮ ТЕМПЕРАТУРЫ УСКОРЯЮЩИХ ЯЧЕЕК

Из выражения (21) следует

$$\frac{\Delta\theta}{\theta} = \frac{\beta_p}{\beta_{gr}} \frac{\Delta f}{f_0}.$$

Пусть изменение частоты вызвано изменением температуры, тогда

$$\Delta f = \frac{\partial f}{\partial T} \Delta T$$

или

$$\frac{\Delta\theta}{\Delta T} = \theta \frac{\beta_p}{\beta_{gr}} \frac{1}{f_0} \frac{\partial f}{\partial T}. \quad (25)$$

Из многократного наблюдения в качестве эмпирического выражения для медных резонаторов S-диапазона можно принять $\partial f/\partial T \approx 50$ кГц/°С. Тогда из (25) и табл. 3 следует

$$\frac{\Delta\theta}{\Delta T} = 0,1^\circ/\text{°C}. \quad (26)$$

Полученное выражение (26) дает зависимость отклонения фазы на одну ускоряющую ячейку от температуры. Согласно табл. 3 для пяти регулярных ускоряющих структур количество ячеек соответствует 425. С учетом этого для поддержания суммарной точности фазы не более 14° необходимо обеспечить точность системы термостабилизации 0,3°С на структуру.

4. ПРОДОЛЬНАЯ ДИНАМИКА В УСКОРЯЮЩЕЙ СТРУКТУРЕ НА ОСНОВЕ ДИАФРАГМИРОВАННОГО ВОЛНОВОДА

Продольную динамику частицы в бегущей волне можно записать в виде следующей системы уравнений:

$$\begin{cases} \frac{dw}{dz} = eE \cos \varphi, \\ \varphi = \omega \int_0^z \frac{dz}{v_p} - \omega t, \end{cases} \quad (27)$$

где E — амплитуда волны, фазовая скорость которой близка к скорости частицы. Фаза φ характеризуется фазовой скоростью волны и временной составляющей положения частицы, которая определяется ее скоростью, т. е. (27) можно переписать в дифференциальном виде:

$$\begin{cases} \frac{d\gamma_e}{d\zeta} = G \cos \varphi, \\ \frac{d\varphi}{d\zeta} = 2\pi \left(\frac{1}{\beta_p} - \frac{1}{\beta_e} \right). \end{cases} \quad (28)$$

Здесь используются нормированные переменные $\zeta = z/\lambda$ и $G = eE\lambda/m_0c^2$ (m_0 — масса покоя электрона), а также учтено, что $d\gamma_e/dz = E/m_0c^2$. Рассматриваемая нами ускоряющая структура рассчитана на фазовую скорость, равную скорости света в вакууме, т. е. $\beta_p = 1$. С учетом этого перепишем (28):

$$\begin{cases} \frac{d\gamma_e}{d\zeta} = G \cos \varphi, \\ \frac{d\varphi}{d\zeta} = 2\pi \left(1 - \frac{1}{\beta_e} \right). \end{cases} \quad (29)$$

Переменные γ_e и φ являются канонически сопряженными, т. е. можно получить гамильтониан, описывающий продольную динамику частиц (29) [8]:

$$H = -G \sin \varphi + 2\pi\gamma_e(1 - \beta_e). \quad (30)$$

Используя определение для релятивистского фактора через относительную скорость

$$\gamma_e = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta_e^2}},$$

из (30) получаем

$$\gamma_e = \frac{1}{2} \left(\frac{H + G \sin \varphi}{2\pi} + \frac{2\pi}{H + G \sin \varphi} \right). \quad (31)$$

Ранее с помощью выражения (1) была получена оптимальная входная мощность $P_0 = 25$ МВт для одной ускоряющей структуры с параметрами, приведенными в табл. 3, необходимая для получения заданной энергии пучка, приведенной в табл. 2. Амплитуду поля, получаемую в структуре с постоянным импедансом при заданной входной мощности, можно определить из выражения [5]:

$$E(z) = E_0 e^{-\alpha z}, \quad (32)$$

где $E_0 = \sqrt{2\alpha R_{sh} P_0}$, α — коэффициент затухания по полю, а R_{sh} — шунтовое сопротивление. В итоге при параметрах структуры, приведенных в табл. 3, начальная амплитуда $E_0 = 16,6$ МВ/м. Будем рассматривать данную величину амплитуды поля для анализа продольной динамики с помощью выражения (31).

На рис. 2 показаны фазовые траектории (31) при разных значениях H . В данном случае при $H > G$ наблюдается колебательное движение по фазовой плоскости, но

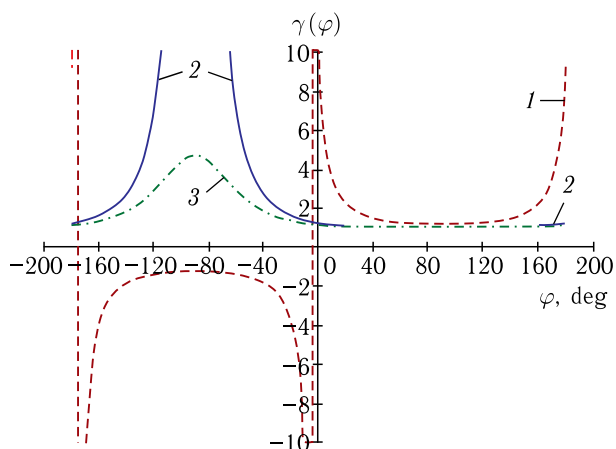


Рис. 2. Продольная фазовая плоскость для ускоряющей структуры на основе диафрагмированного волновода с амплитудой напряженности электрического поля 16,6 МВ/м: 1 — $H < G$; 2 — $H = G$; 3 — $H > G$

без увеличения энергии. $H < G$ является областью захвата, когда, начиная с определенной фазы, происходит стремительный рост энергии. Режим $H = G$ можно условно считать сепаратрисой.

Из рис. 2 видно, что оптимальным значением начального релятивистского фактора является

$$\gamma_{inj} > 2, \quad (33)$$

что соответствует кинетической энергии $W_{inj} > 0,511$ МэВ.

На первый взгляд полученный вывод является очевидным для ускоряющей структуры с фазовой волной, равной скорости света. Действительно, полученное значение для энергии инжекции пучка в регулярную ускоряющую структуру на основе диафрагмированного волновода является приемлемым с точки зрения захвата в режим ускорения, но кроме этого надо учитывать краевое поле в ускоряющей структуре, которое рождает поперечные силы, вызывающие фокусировку пучка. При низкой энергии данные силы могут быть существенными, что приведет к появлению большого угла на входе в ускоряющую структуру, который в дальнейшем может отрицательно влиять на поперечную динамику. Таким образом, не стоит использовать минимальную энергию инжекции 0,511 МэВ.

5. ПОПЕРЕЧНАЯ ДИНАМИКА В УСКОРЯЮЩЕЙ СТРУКТУРЕ НА ОСНОВЕ ДИАФРАГМИРОВАННОГО ВОЛНОВОДА

Уравнение движения для радиус-вектора в цилиндрической системе координат имеет вид

$$\frac{d}{dt} (\gamma_e m_0 \dot{r}) = \gamma_e m_0 r \dot{\theta}^2 + q E_r + q (r \dot{\alpha} B_z - \dot{z} B_\theta). \quad (34)$$

Будем считать, что никаких магнитных полей нет и катод не является замагниченным. С учетом

$$\frac{d}{dt}(\gamma_e m_0 \dot{r}) = \gamma_e m_0 \ddot{r} + \dot{r} \dot{\gamma}_e m_0$$

имеем

$$\gamma_e \ddot{r} + \dot{r} \dot{\gamma}_e - \frac{e}{m_0} E_r = 0. \quad (35)$$

Перейдем от дифференцирования по времени к дифференцированию по продольной координате:

$$\begin{aligned} \frac{dr}{dt} &= \frac{dr}{dz} v_z = r' \beta_e c, \\ \frac{d^2 r}{dt^2} &= \frac{dr}{dz} \left(\frac{dr}{dz} v_z \right) \frac{dz}{dt} = r'' \beta_e^2 c^2 + r' \dot{\beta}_e \beta_e c^2, \\ \frac{d\gamma_e}{dt} &= \dot{\gamma}_e \beta_e c, \end{aligned}$$

что позволяет преобразовать (35):

$$r'' + \left(\frac{\beta_e'}{\beta_e} + \frac{\dot{\gamma}_e}{\gamma_e} \right) r' - \frac{e}{m_0 c^2 \gamma_e \beta_e^2} E_r = 0. \quad (36)$$

Производную относительной скорости частицы можно записать через релятивистский фактор

$$\beta_e' = \left(1 - \frac{1}{\gamma_e^2} \right)^{-1/2} \frac{1}{\gamma_e^3} \dot{\gamma}_e = \frac{\dot{\gamma}_e}{\beta_e \gamma_e^3}.$$

В итоге имеем

$$r'' + \frac{\dot{\gamma}_e}{\gamma_e \beta_e^2} r' - \frac{e}{m_0 c^2 \gamma_e \beta_e^2} E_r = 0. \quad (37)$$

Радиальную компоненту электрического поля ускоряющей структуры в линейном приближении можно выразить как

$$E_r = -\frac{1}{2} r E_z' = -\frac{1}{2} r \frac{m_0 c^2}{e} \gamma_e'',$$

окончательно запишем (37):

$$r'' + \frac{\dot{\gamma}_e}{\gamma_e \beta_e^2} r' + \frac{\gamma_e''}{2\gamma_e \beta_e^2} r = 0. \quad (38)$$

Выражение (38) является уравнением параксиального луча [6]. Видно, что оно является уравнением маятника с вынуждающей силой. Ускорение обеспечивает производная от релятивистского фактора, т.е. продольное электрическое поле. При наличии γ_e'' появляется фокусирующая составляющая.

Рассмотрим только вход в ускоряющую структуру на основе диафрагмированного волновода. В этом случае можно считать, что ускорение пучка еще не наступило и уравнение (38) примет вид

$$r'' + \frac{\gamma_e''}{2\gamma_e \beta_e^2} r = 0. \quad (39)$$

Из (39) видно, что край ускоряющей структуры можно представить в виде тонкой линзы и можно записать выражение для фокусного расстояния [6]:

$$\frac{1}{f} = \int_0^{z_1} \frac{\gamma_e''}{2\gamma_e\beta_e^2} dz, \quad (40)$$

где z_1 — координата, при которой можно считать прекращение действия краевого эффекта структуры. Как было сказано выше, можно считать, что ускорение на промежутке $[0, z_1]$ еще не происходит, а значит,

$$\frac{1}{f} \approx \frac{E(z_1)}{2\gamma_e\beta_e^2 m_0 c^2}. \quad (41)$$

В выражении (41) учтено, что $\gamma_e'(z) = E(z)/m_0 c^2$ и $E(0) = 0$, а энергия покоя $m_0 c^2$ измерится в электронвольтах. На рис. 3 показана зависимость фокусного расстояния от γ_e при амплитуде электрического поля $E(z_1) = E_0 = 16,6$ МВ/м. Как следует из графика (см. рис. 3), при малых значениях энергии пучка фокусное расстояние составляет несколько десятков сантиметров. При росте энергии пучка фокусное расстояние увеличивается и уже при $\gamma_e = 10$,

что соответствует $W_{inj} = 4,5$ МэВ, находится в области 0,7 м.

Таким образом, несмотря на то, что захват частиц в режиме ускорения может быть осуществлен уже при энергии инжекции в области 0,5 МэВ, угол, приобретаемый пучком при входе в регулярную ускоряющую структуру, будет весьма значительным. Все это приведет к быстрой перефокусировке пучка, а значит, к неоптимальной поперечной динамике. Стоит отметить, что компенсация приобретаемого частицами угла за счет выходного края ускоряющей структуры будет незначительна, поскольку в ее конце пучок будет иметь энергию в области 42 МэВ, что соответствует фокусному расстоянию около 5 м.

Ускоряющая структура на основе диафрагмированного волновода состоит из набора периодических элементов со связью по электрическому полю (см. рис. 1). Это значит, что распределение продольной компоненты электрического поля внутри секции имеет неоднородную структуру с градиентами вблизи диафрагм связи. Таким образом, вход и выход ускоряющих ячеек также можно представить в виде двух тонких линз, первая из которых — фокусирующая, а вторая — дефокусирующая. Поскольку пучок приобретает энергию в ускоряющих ячейках, то согласно (41) эффект от данных двух линз будет разным. В итоге пучок будет осциллировать внутри структуры, но в среднем будет фокусироваться, поскольку дефокусирующие силы всегда меньше фокусирующих из-за роста энергии частиц. Тем не менее самый сильный эффект будет наблюдаться на входе в первую ускоряющую структуру. Можно заключить, что энергию инжекции пучка лучше иметь не менее 3 МэВ. В этом случае

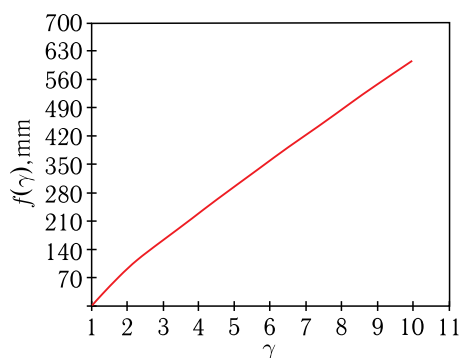


Рис. 3. Зависимость фокусного расстояния от релятивистского фактора при амплитуде ускоряющего поля $E(z_1) = E_0 = 16,6$ МВ/м

перед регулярными ускоряющими структурами необходимо будет иметь предусоряющую структуру, обеспечивающую плавное увеличение энергии со значения источника электронов до 3 МэВ или более.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С учетом проделанных расчетов и оценок можно заключить, что для стабильной работы линейного ускорителя инжектора СКИФ на входе регулярных ускоряющих структур на основе диафрагмированных волноводов необходимо иметь пучок с длиной не более $\sigma_b = 4,5$ мм и энергией 3 МэВ или больше. Ограничения на начальные параметры пучка говорят о необходимости создания отдельной группирующей и предусоряющей системы. Данная система должна быть разработана и рассчитана, поскольку ранее в ИЯФ СО РАН не использовалась. При этом для нее потребуются дополнительные источники питания, в том числе часть мощности используемых клистронов, что также должно быть учтено.

Предел на суммарный фазовый сдвиг $\sigma_\theta = 14^\circ$ приводит к критерию точности изготовления ускоряющих структур. Суммарная вариация для радиусов ускоряющих ячеек должна быть в области 0,1 мм, а для периодов — 4,1 мм. Данные значения показывают суммарную вариацию и не отражают в явном виде точности изготовления. Тем не менее, зная общее количество ускоряющих ячеек в пяти предполагаемых ускоряющих структурах, можно понять, что на одну ячейку приходится точность для радиуса 0,24 мкм и 10 мкм для периода. Обеспечение точности 10 мкм возможно, но 0,24 мкм — маловыполнимо. Кроме этого, надо понимать, что после пайки ускоряющих ячеек размеры могут дополнительно измениться. Тем не менее, если говорить не о механической точности, а о частотной, то 0,24 мкм для радиуса соответствуют точности настройки частоты 16 кГц. Данная величина уже вполне выполнима при наличии специально подготовленных мест на внешнем радиусе ускоряющих ячеек, которые можно деформировать. Однако ускоряющие структуры на основе диафрагмированного волновода, которые производятся в ИЯФ СО РАН для инжекционного комплекса ВЭПП-5, не обладают возможностью подстройки частоты после их изготовления. Таким образом, для линейного ускорителя инжектора СКИФ необходимо внести изменения в имеющуюся конструкцию ускоряющих структур.

Для системы термостабилизации также получена точность исходя из суммарного сдвига фазы волны на ускоряющую ячейку, которая составляет $0,3^\circ\text{C}$ на структуру. Данное значение близко к параметрам системы термостабилизации, используемой на инжекционном комплексе ВЭПП-5.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Wang J. W. RF Properties of Periodic Accelerating Structures for Linear Colliders. Stanford, California, 1989. 138 p.
2. Александров А. В., Авилон М. С., Антошин А. В. Испытание прототипа форинжектора ВЭПП-5. Препринт ИЯФ. Новосибирск: ИЯФ; НГТУ, 1997. 23 с.
3. Лебедев И. В. Техника и приборы СВЧ. Т. 1. М.: Высш. шк., 1970. 440 с.

4. *Akimov V. E., Ivanov A. V., Kazarezov I. V. et al.* 200 keV Pulse Electron Beam Source for the VEPP-5 Injection Complex // Proc. of RuPAC 2006. P. 386–388.
5. *Wangler T.* RF Linear Accelerators. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2008. P. 20; 73; 83.
6. *Лоусон Дж.* Физика пучков заряженных частиц. М.: Мир, 1980. 439 с.
7. Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН. <http://www.inp.nsk.su/nauka/issledovatelskaya-infrastruktura/proekty/sibirskij-istochnik-si/> (дата обращения: 15.06.2019).
8. *Капчинский И. М.* Динамика частиц в линейных резонансных ускорителях. М.: Атомиздат, 1966. С. 32–35.

Получено 1 августа 2019 г.