

УСКОРИТЕЛИ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ ДЛЯ ЯДЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

УДК 621.384.644

ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЗОНАТОРОВ ИИ-ТИПА С ЦЕЛЬЮ СНИЖЕНИЯ ПИКОВЫХ ЗНАЧЕНИЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА ПОВЕРХНОСТИ

© 2024 г. А. А. Горчаков^а, *, Я. В. Шашков^а

^аНациональный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, 115409 Россия

*E-mail: AAGorchakov@mephi.ru

Поступила в редакцию 14.06.2023 г.

После доработки 13.07.2023 г.

Принята к публикации 17.07.2023 г.

В работе представлены результаты расчетов электродинамических характеристик коротких пятизачерных ускоряющих резонаторов ИИ-типа, предназначенных для линейного ускорителя протонов и легких ионов с отношением заряда к массе A/Z от 1 до 3.5 для источника заряженных частиц с энергией пучка 7.5 МэВ/нуклон, разрабатываемого в НИЯУ МИФИ и предназначенного для научного и прикладного назначения. Рассмотрены вопросы комплексного влияния геометрии трубок дрейфа и геометрии опоры трубок дрейфа на величину напряженности поля на поверхности резонаторов, величину мощности потерь в стенках резонаторов и распределение ускоряющего поля на оси с учетом влияния точности разбиения сеткой в ходе моделирования.

Ключевые слова: структура ИИ-типа, ИИ полость, ИИ-DTL

DOI: 10.56304/S207956292303017X

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время при создании ускорителей протонов и ионов получил широкое распространение модульный подход формирования ускоряющего тракта с использованием независимо фазуемых ВЧ секций с малым числом периодов [1, 2]. В линейном ускорителе, состоящем из независимо фазуемых резонаторов, можно изменять профиль скорости синхронной частицы и, следовательно, изменять выходную энергию, что особенно важно в линейных ускорителях ионов, ускоряющих частицы с различным отношением массы к заряду [3, 4].

Данная схема позволяет организовать поэтапный ввод модулей ускорителя по мере увеличения энергии пучка заряженных частиц, повышает надежность работы и снижает риск простоя системы в процессе ее запуска и обслуживания за счет использования независимых модулей, которые могут быть заменены или отключены без длительного прерывания работы всей установки. Кроме этого, использование унифицированных элементов позволяет снизить стоимость установки в целом.

Данный подход был использован в ходе разработки линейного резонансного ускорителя протонов и легких ионов с отношением заряда к массе A/Z от 1 до 3.5 для источника заряженных частиц с энергией пучка 7.5 МэВ/нуклон, разрабатываемого в НИЯУ МИФИ и предназначенного для научного и прикладного назначения [5]. В состав

ускорителя входят два типа источников ионов: ЭЦР для протонов и пучка ионов He и лазерный источник ионов для ионов от Li до O. Ускорение частиц до энергии 0.8 МэВ/нуклон обеспечивается структурой с пространственно-однородной квадрупольной фокусировкой (ПОКФ, RFQ). Для ускорения частиц от энергии 0.8 МэВ до энергии 7.5 МэВ ($\beta \sim 0.1$) были выбраны резонаторы ИИ-типа.

Резонаторы ИИ-типа являются наиболее эффективными для ускорения легких ионов с относительной скоростью от 0.05 c до 0.2 c [6–8]. В классической схеме компоновки ускорителей ионов в данной области скоростей успешно используют многозачерные резонаторы ИИ-типа с увеличением длины ускоряющих зазоров с учетом увеличения скорости частиц, с фокусирующими магнитами расположенными в объеме резонатора [9]. Данные резонаторы являются крайне эффективными, однако изготовление, юстировка на этапе изготовления, настройка и техническое обслуживание таких структур может занимать длительное время.

В рамках применения модульного подхода к формированию ускоряющего тракта было предложено использование двух групп независимо фазуемых резонаторов ИИ-типа с пятью зазорами (рис. 1) с фокусирующими квадрупольными линзами между ними.

Первая группа резонаторов рассчитана на ускорение частиц от 0.8 МэВ/нуклон ($\beta = 0.04$) до

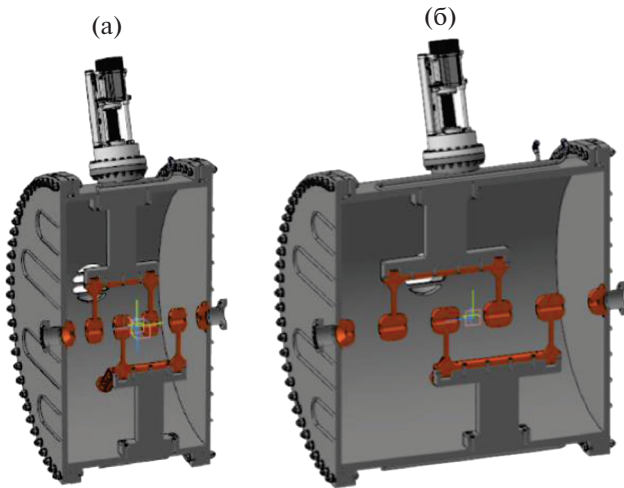


Рис. 1. Резонаторы ИН-типа: (а) первая группа ИН-1, $\beta_g = 0.057$; (б) вторая группа ИН-2, $\beta_g = 0.099$.

2.5 МэВ/нуклон ($\beta = 0.07$), вторая группа резонаторов от 2.5 МэВ/нуклон ($\beta = 0.07$) до 7.5 МэВ/нуклон ($\beta = 0.126$) [10–17]. Рабочая частота резонаторов 81.25 МГц. Ниже приведены результаты расчетов электродинамических характеристик (ЭДХ) резонаторов с различными типами трубок дрейфа.

2. ТРЕБОВАНИЯ К ЭДХ РЕЗОНАТОРОВ

При проектировании резонаторов необходимо учитывать: требования, предъявляемые к темпу ускорения частиц; требования к величине мощности потерь в стенках резонаторов, обусловленные как экономической составляющей, так и доступностью источников питания; ограничения по предельно допустимой величине напряженности электрического поля на поверхности структуры для предотвращения высокочастотного пробоя. Помимо этого при проектировании резонаторов ИН-типа необходимо учитывать характерную особенность встречно штыревых структур – наличие поперечных компонент электрического E_y и магнитного B_x полей на оси структуры, отклоняющих ускоряемые частицы.

Согласно расчету динамики пучка частиц разрабатываемого ускорителя, для обеспечения требуемого темпа ускорения заряженных частиц, напряжение на резонаторах первой группы должно составлять не менее 1.5 МВ, для резонаторов второй группы не менее 3.0 МВ. При этом мощность питания не должна превышать 60 кВт для резонаторов первой группы и 160 кВт для резонаторов второй группы. Диаметр резонатора должен составлять не более 1.0 м, что связано с технологическими ограничениями производства.

С учетом требуемых ускоряющих напряжений и предельно допустимых значений мощности по-

терь шунтовое сопротивление для резонаторов первой группы должно составлять не менее 38 МОм, для резонаторов второй группы не менее 56 МОм, без учета нагрузки пучком.

Напряженность поля на поверхности резонатора E_p – параметр который определяет порог возникновения высокочастотного пробоя и ограничивает ускоряющее напряжение. Для определения порога возникновения пробоя на поверхности медных высокочастотных резонаторов в диапазоне от 50 до 1500 МГц используют критерий Килпатрика [18]:

$$f = 1.64 E_k e^{-8.5 E_k},$$

где f – частота ВЧ поля [МГц], а E_k – максимальная напряженность электрического поля на поверхности [МВ/м] без возникновения пробоя. Для структур, работающих в импульсном режиме, также используют поправочный коэффициент b , зависящий от длительности импульса и лежащий в диапазоне от 1 до 2 [19]:

$$E_p = b E_k.$$

При длительности импульса менее 1.0 мс, значение коэффициента b максимально и может быть выбрано равным 2.0.

Для резонаторов, рассчитанных на рабочую частоту 81.25 МГц, согласно критерию Килпатрика в непрерывном режиме, предельно допустимая величина напряженности электрического поля на поверхности без возникновения пробоев составляет 10.535 МВ/м. При работе в импульсном режиме с длительностью импульса менее 1.0 мс величина предельно допустимого значения напряженности поля на поверхности E_p ограничивается величиной 21.07 МВ/м ($b = 2$).

3. ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИИ ТРУБОК ДРЕЙФА НА ЭДХ РЕЗОНАТОРОВ

Эффективность резонатора определяется величиной потерь в стенках структуры. Чем выше шунтовое сопротивление структуры тем ниже потери. Максимальную эффективность можно получить при использовании трубок дрейфа малой толщины (рис. 2а). Однако величина напряженности поля на поверхности трубки дрейфа не позволяет получить высокие значения напряжения на резонаторе, а следовательно высокий темп ускорения. Так же, в трубках дрейфа с малой толщиной, следует отметить высокие значения поперечных компонент поля на оси резонатора, негативно влияющих на динамику пучка.

Снижение напряженности поля на поверхности трубок дрейфа обеспечивается за счет увеличения толщины трубки дрейфа (рис. 2б). Однако при этом величина шунтового сопротивления резо-

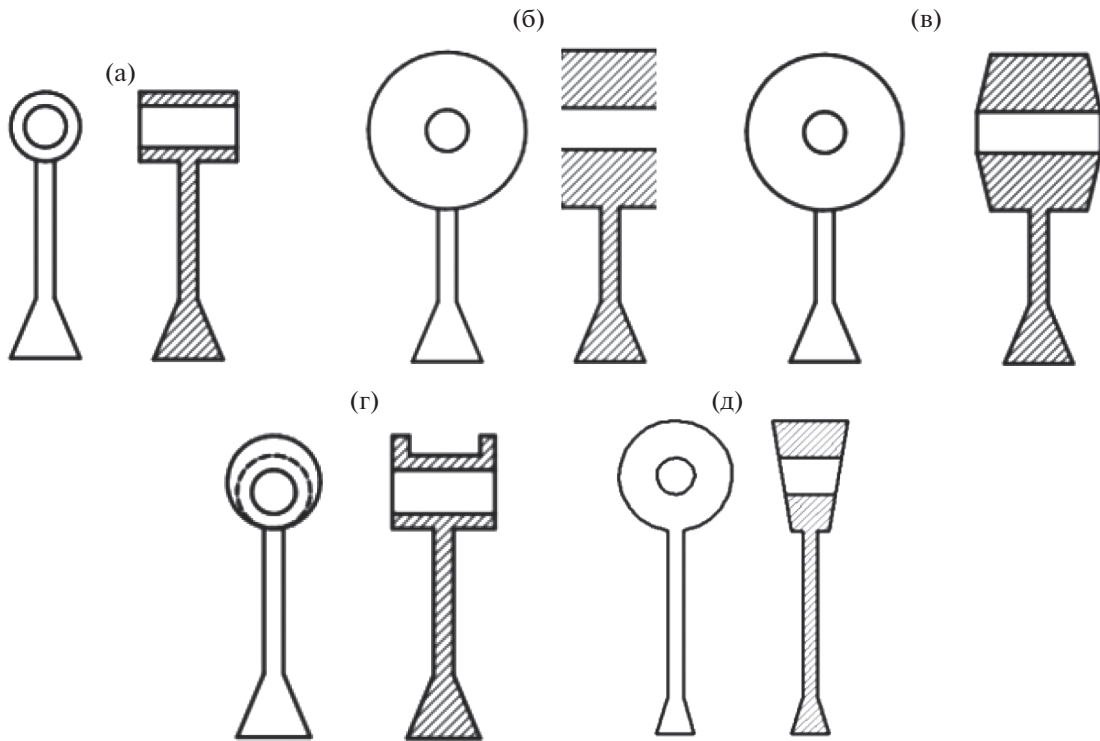


Рис. 2. Различные геометрии трубок дрейфа.

натора падает, потери в стенках растут и снижается эффективность структуры. Помимо этого структуры с большой толщиной трубок дрейфа подвержены такому явлению как мультипакторный разряд, возникающий между двумя параллельными плоскостями соседних трубок дрейфа, что приводит к деградации поверхности. Для решения этой проблемы используют трубки дрейфа со скосами (рис. 2в) [20].

Большая работа по оптимизации трубок дрейфа для сохранения высоких значений шунтового сопротивления и снижению величины поперечных компонент поля на оси была проведена в Центре по изучению тяжелых ионов имени Гельмгольца (Дармштадт, Германия) [21]. Было предложено использование компенсационных колец (рис. 2г), позволяющих снизить влияние поперечных составляющих компонент поля на пучок заряженных частиц. Этот метод дает хороший результат, однако сохраняются ограничения по величине напряженности поля на поверхности компенсационных колец и следовательно предельно достижимому темпу ускорения.

Еще одним способом снижения влияния поперечных компонент поля является метод несимметричных скосов (рис. 2д), который хорошо зарекомендовал себя в резонаторах на основе коаксиальных четвертьволновых линий с двумя ускоряющими зазорами и позволяет их использование четверть-

волновых резонаторов до относительных скоростей вплоть до 0.12 c [22].

Для двух групп 81.25 МГц резонаторов ИИ-типа с пятью ускоряющими зазорами с различными типами геометрии трубок дрейфа при максимальных значениях рабочего ускоряющего напряжения, были рассчитаны: шунтовое сопротивление резонатора R_{sh} ; напряженность поля на поверхности резонатора E_p и коэффициент перенапряженности b ; напряженность поперечной компоненты ускоряющего поля на оси резонатора E_y ; величина поперечной компоненты магнитного поля на оси структуры H_x . Результаты расчета представлены в табл. 1. Настройка частоты резонатора при сохранении габаритных размеров осуществлялась за счет изменения ширины второго колена опоры трубок дрейфа. Радиус апертуры пролетного канала трубки дрейфа $r_a = 9.0$ мм. Толщина трубок дрейфа t , угол скоса трубок дрейфа α и внешний радиус скругления трубок дрейфа r_{Bland} для каждого типа геометрии приведены в табл. 1.

Показано, что для первой группы резонаторов все варианты трубок дрейфа удовлетворяют требованию по величине шунтового сопротивления, однако при требовании напряжения на резонаторе 1.5 МВ малая толщина трубок дрейфа и радиусов скругления не позволяют получить приемлемую величину напряженности поля на поверхно-

Таблица 1. Сравнение основных ЭДХ структур с различными трубками дрейфа

Параметр	Форма трубок дрейфа						
	ИИ-1 ($U = 1.5$ МВ)			ИИ-2 ($U = 3.0$ МВ)			
	(а, б)	(в)	(г)	(а, б)	(в)	(г)	(д)
$\alpha, ^\circ$	8	30	0	8	0	0	15
$t, \text{ мм}$	31.0	36	5	5.0	36	5.0	36
$r_{\text{Bland}}, \text{ мм}$	2	10	2	2	27.5	2	25
$R_{\text{sh}}, \text{ МОм}$	51	50	69	84	57	102	67
$r_{\text{sh}}, \text{ МОм/м}$	97	95	131	92	62	111	73
$E_p, \text{ МВ/м}$	31.0	15.9	25.1	32.8	20.0	41.0	21.0
$b = E_p/E_k$	2.9	1.5	2.4	3.1	1.9	3.9	2.0
$E_{y_{\text{max}}}, \text{ МВ/м}$	0.3	0.3	1.2	1.4	1.2	1.1	2.4
$H_{x_{\text{max}}}, \text{ кА/м}$	3.9	3.9	4.0	3.1	4.0	4.0	4.0
$D, \text{ м}$				<1.0			

сти, удовлетворяющую критерию Килпатрика для данной частоты и режима работы резонатора.

Для второй группы резонаторов можно видеть, что трубки дрейфа с компенсационными кольцами позволяют существенно увеличить величину шунтового сопротивления и снизить величину отклоняющей компоненты электрического поля на оси, однако из-за малого радиуса кривизны напряженность поля на поверхности существен-

но превышает допустимое значение при напряжении на резонаторе 3.0 МВ.

Отдельно следует отметить вариант геометрии с несимметричными скосами (д) для второй группы резонаторов, где отклоняющая поперечная составляющая выше, чем в первой группе. На рис. 3 приведены графики распределения поперечной компоненты электрического поля E_y вдоль оси пролета пучка для геометрии без скосов и со ско-

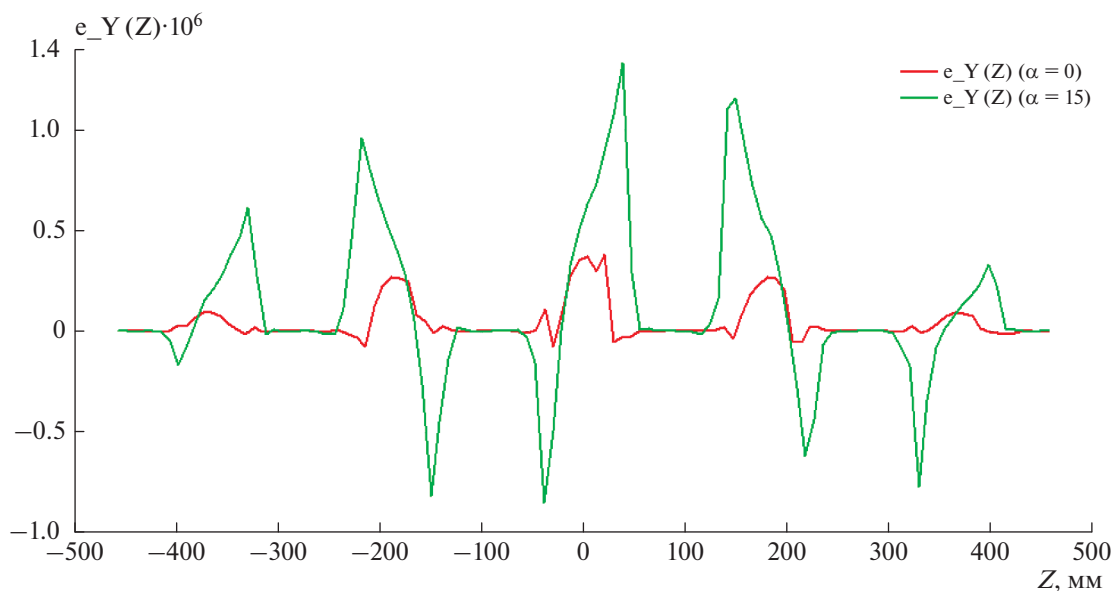


Рис. 3. Графики распределения поперечной компоненты электрического поля E_y вдоль оси пролета пучка в резонаторах второй группы ИИ-2 при напряжении $U = 3.0$ МВ.

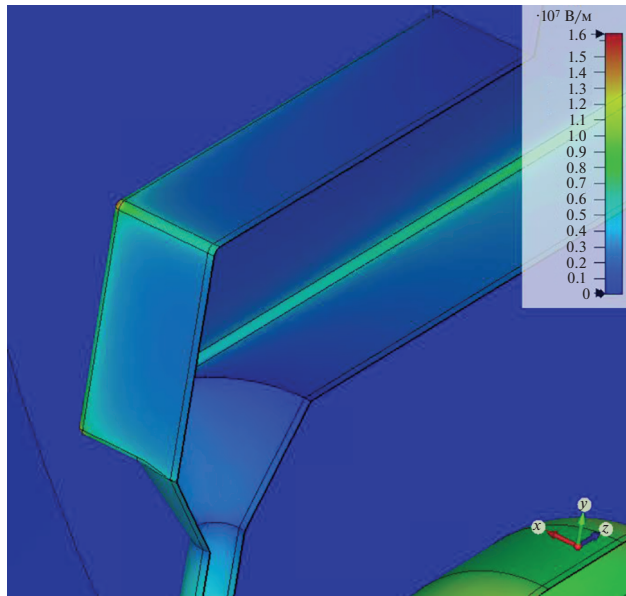


Рис. 4. Локальное увеличение напряженности поля на поверхности опоры.

сом 15° . Можно отметить, что несимметричные скосы позволяют изменить распределение поля, однако пиковые величины напряженности существенно возрастают. Для более точной оценки влияния поперечной составляющей на динамику пучка требуется моделирование динамики частиц с учетом полного трехмерного распределения поля.

4. ВЛИЯНИЕ ПОРЯДКА КРИВЫХ ПРИБЛИЖЕНИЯ ПРИ РАЗБИЕНИИ СЕТКОЙ МОДЕЛИ РЕЗОНАТОРА ПРИ РАСЧЕТЕ ВЕЛИЧИНЫ НАПРЯЖЕННОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА ПОВЕРХНОСТИ СТРУКТУРЫ

При расчете величин напряженности поля на поверхности резонаторов E_p критическое значение приобретает точность разбиения сеткой. В пакете программ трехмерного моделирования электрофизических процессов CST Studio Suite [23] реализована функция выбора порядка кривых ребер тетраэдральной сетки. По умолчанию используются кривые второго порядка. С увеличением порядка возрастает точность расчетов, при уменьшении количества узлов. Кроме принудительного выбора порядка кривых, в программе реализована возможность автоматического выбора для различных областей структуры.

Геометрия резонаторов ИИ-типа, рассчитанных на частоту 81.25 МГц, имеет большое количество свободного пространства в объеме резонатора, что делает целесообразным использование кривых ребер тетраэдральной сетки наивысшего порядка.

Но учитывая сложность геометрии, миниатюрность некоторых видов трубок дрейфа, к примеру, трубки дрейфа с компенсационными кольцами, возможно использование автоматического режима выбора порядка решателя для различных областей резонатора в случаях сложной геометрии трубок дрейфа.

Для проверки точности расчета значений напряженности полей на поверхности с использованием автоматического выбора порядка построения сетки были проведены дополнительные расчеты электродинамических характеристик резонаторов с использованием кривых второго и третьего порядков. Увеличение точности порядка приближения не повлияло на расчетные значения напряженности полей в области трубок дрейфа, полученные при использовании автоматического разбиения с использованием функции “Adaptive Mesh”, однако были обнаружены локальные места повышения напряженности электрического поля на поверхности резонаторов второй группы в области опоры крепления трубок дрейфа при напряжении 3.0 МВ (рис. 4).

Проведены расчеты влияния радиуса скругления торцов опоры трубок дрейфа (Bland Stem, мм) на величину напряженности электрического поля в данной области. График зависимости коэффициента перенапряжения b от радиуса скругления торцов балки при напряжении на резонаторе 3.0 МВ приведен на рис. 5. Показано, что радиус скругления должен составлять не менее 5.0 мм для удовлетворения требованиям по предотвра-

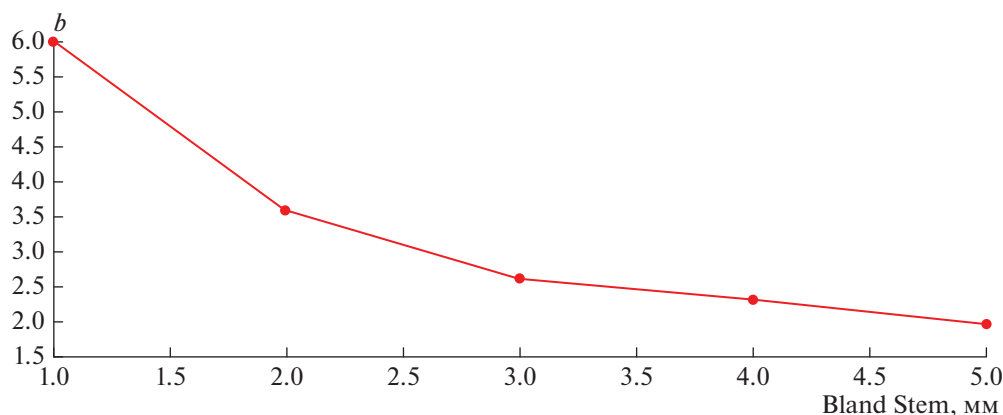


Рис. 5. Зависимость коэффициента перенапряжения b от радиуса скругления торцов опоры трубок дрейфа при напряжении на резонаторе второй группы ИН-2 $U = 3.0$ МВ.

шению возникновения высокочастотного пробоя $b = E_p/E_k < 2.0$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показано, что для резонаторов первой группы ИН-1, при ускоряющем напряжении на резонаторе до 1.5 МВ возможно использование трубок дрейфа со скосами для предотвращения мультипакторного разряда и увеличенным радиусом скругления для обеспечения удовлетворительных значений коэффициента перенапряженности.

Для резонаторов второй группы ИН-2, при ускоряющем напряжении на резонаторе до 3 МВ, возможно использование трубок дрейфа с радиусом скругления не менее 27.5 мм, обеспечивающего удовлетворительное значение коэффициента перенапряженности и снижающего риск возникновения мультипакторного разряда. Так же следует отметить, что структура с несимметричными скосами так же показывает удовлетворительные результаты расчета ЭДХ и при этом более высокое шунтовое сопротивление по сравнению со структурой без скосов, однако в ней выше пиковые значения поперечного отклоняющего поля на оси пролета пучка.

Анализ величины отклонения частицы поперечными компонентами поля в первом приближении представлен в работе [17]. Работы по исследованию влияния поперечных компонент отклоняющего поля продолжаются.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. *Nolen J.A. et al.* Argonne National Laboratory Report No. ATLAS-99-1. 1999.
2. *Ostroumov P.N., Shepard K.W.* // Phys. Rev. Spec. Top. Accel. Beams. 2000. V. 3. P. 030101.
3. *Batygin Yu.K.* // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A. 2022. V. 1040. P. 167192. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2022.167192>
4. *Masunov E.S., Samoshin A.V.* // Proc. RuPAC-2008. 2008. P. 28.
5. *Polozov S.M. et al.* // Proc. RuPAC'21. 2021. P. 51. <https://doi.org/10.18429/JACoW-RuPAC2021-TUB07>
6. *Bres M. et al.* // Part. Accel. 1971. V. 2. P. 17.
7. *Weis T., Klein H., Schempp A.* // IEEE Trans. Nucl. Sci. 1983. V. 30 (4). P. 3548.
8. *Kurennoy S., Rybarcyk L., and Wangler T.* // Proc. PAC'07. 2007. P. 3824.
9. *Kurennoy S., O'Hara J., Rybarcyk L.* // Proc. HB-2008. 2008. P. 428.
10. *Горчаков А.А. и др.* // Ядерная физика и инжиниринг. 2022. Т. 13 (3). С. 304 [*Gorchakov A.A. et al.* // Phys. At. Nucl. 2021. V. 84 (12). P. 2018].
11. *Горчаков А.А. и др.* // Сб. тр. конф. ЛаПлаз-2021. 2021. Ч. 2. С. 404.
12. *Горчаков А.А. и др.* // Сб. тр. конф. ЛаПлаз-2021. 2021. Ч. 2. С. 410.
13. *Булгачева М.М., Гусарова М.А.* // Сб. тр. конф. ЛаПлаз-2022. 2022. С. 315.
14. *Булгачева М.М. и др.* // Ядерная физика и инжиниринг. 2023. Т. 14 (6). С. 593 [*Bulgacheva M.M. et al.* // Phys. At. Nucl. 2022. V. 85 (12). P. 2061].
15. *Булгачева М.М. и др.* // Письма в ЭЧАЯ. 2023. Т. 20 (4). С. 249.
16. *Bulgacheva M.M. et al.* // Phys. Part. Nucl. Lett. 2023. V. 20 (4). P. 720.
17. *Сулимов А.С.* // Сб. тр. конф. ЛаПлаз-2023. 2023. С. 312.
18. *Kilpatrick W.D.* // Rev. Sci. Instrum. 1957. V. 28 (10). P. 824. <https://doi.org/10.1063/1.1715731>
19. *Thomas P. Wangler.* RF Linear Accelerators. 2008. Weinheim: Wiley.
20. *Grespan F. et al.* ESS DTL: RF Design. ESS Report. 2013. Lund.
21. *Ratzinger U.* H-Type Linac Structures. CERN Yellow Report 2005003. 2005. Geneva: CERN.
22. *Facco A., Zvyagintsev V.* // Phys. Rev. Spec. Top. Accel. Beams. 2011. V. 14. P. 070101. <https://doi.org/10.1103/PhysRevSTAB.14.070101>
23. *Computer Simulation Technology*, <https://www.cst.com>.

Optimization of IH-type Resonators to Reduce the Peak Values of the Electric Field on the Surface

A. A. Gorchakov¹, * and Ya. V. Shashkov¹

¹National Research Nuclear University MPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, 115409 Russia

*e-mail: AAGorchakov@mephi.ru

Received June 14, 2023; revised July 13, 2023; accepted July 17, 2023

Abstract—Results of calculations of the electrodynamic characteristics of short five-gap accelerating cavities of the IH type are presented. The cavities are designed for a linear accelerator of protons and light ions with a charge-to-mass ratio A/Z ranging from 1 to 3.5. Developed at National Research Nuclear University MPhI, this accelerator, which is designed as a source of charged particles with a beam energy of 7.5 MeV/nucleon, is intended for basic and applied research. The issues of the complex influence of the geometry of the drift tubes and the geometry of the drift tube support on the magnitude of the field strength on the surface of the resonators, the power losses in the walls of the resonators, and the distribution of the accelerating field on the axis are considered, taking into account the influence of the accuracy of segmenting in simulation.

Keywords: interdigital H-type structure, IH cavity, IH-DTL