

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ УСКОРЯЮЩЕГО РЕЗОНАТОРА НАЧАЛЬНОЙ ЧАСТИ ЛИНЕЙНОГО УСКОРИТЕЛЯ ПРОТОНОВ

К. А. Липенкова, А. А. Брехова, Л. Е. Поляков, М. Л. Сметанин

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

При работе в непрерывном режиме ускоряющая высокочастотная (ВЧ) структура подвергается высоким тепловым нагрузкам, которые могут привести к изменению геометрии внутренней полости резонатора и его составных частей и, как следствие, к уходу резонансной рабочей частоты. Это может привести к дополнительным потерям и изменениям параметров пучка заряженных частиц. В результате этого, задача обеспечения термостабилизации является чрезвычайно актуальной, так как напрямую связана с эффективностью работы ускоряющей структуры. С целью обеспечения термостабилизации ускоряющей структуры необходимо предусмотреть водяное охлаждение в наиболее теплонагруженных областях резонатора.

В программе трехмерного моделирования построена 3D-модель четырехлопастного ускоряющего резонатора (4К-резонатор) с пространственно-однородной квадрупольной фокусировкой (ПОКФ) с окнами магнитной связи.

Проведен расчет распределения мощности тепловых потерь и температурных распределений в 4К-резонаторе. В результате проведения расчетов была предложена оптимальная конфигурация каналов водяного охлаждения, расположенных внутри лопастей резонатора. Данная конфигурация обеспечивает стабильный тепловой режим и неизменность геометрии резонатора.

Введение

В настоящее время рассмотрение возможности создания синхротронного комплекса является актуальной задачей. Циклический ускоритель – синхротрон позволяет получать высокоэнергетичные пучки протонов, легких ионов и тяжелых заряженных частиц. Качество пучка, получаемое на выходе синхротрона, во многом определяется параметрами линейного ускорителя, который будет использован в качестве инжектора для синхротрона.

Чаще всего в качестве начальной части линейного ионного ускорителя применяется ускоряющая структура с ПОКФ (международное название Radio Frequency Quadrupole, RFQ), где частицы группируются и ускоряются от нескольких десятков кэВ до 2–3 МэВ, а затем инжектируются в основную часть ускорителя [1].

Важным этапом в разработке ускоряющей структуры является расчет тепловых характеристик резонатора. Реализации непрерывного режима работы ускорителя предполагает высокие тепловые нагрузки, которые могут привести к сдвигу частоты рабочей моды. Поэтому задача термостабилизации ускоряющего резонатора с ПОКФ является чрезвычайно актуальной задачей.

Ускоряющий резонатор с ПОКФ

В программе трехмерного моделирования построена модель четырехлопастного резонатора (4К-резонатор) с пространственно-однородной квадрупольной фокусировкой с окнами магнитной связи.

По сравнению с традиционным 4К-резонатором, резонатор с окнами связи более компактен и имеет лучшее разделение рабочего (квадрупольного) и паразитного (дипольного) типа электромагнитных колебаний [2].

Проведена аналитическая оценка электродинамических характеристик резонатора. Для достижения требуемых темпа ускорения и выходной энергии протонов, в создаваемой модели необходимо обеспечить разность потенциалов между электродами 120 кВ на всем протяжении ускоряющей структуры.

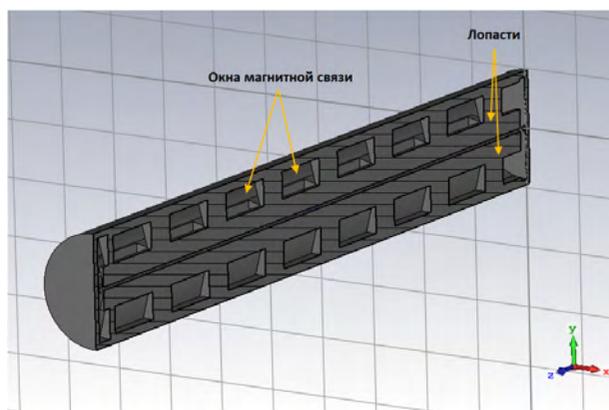


Рис. 1. Трехмерная модель четырехкамерного резонатора

С использованием электродинамического расчета на собственных модах была оптимизирована геометрия резонатора (рис. 1) и получены его основные электродинамические характеристики. В качестве материала резонатора в расчете использовался идеальный проводник (ПЕС) с проводимостью $\sigma = 5,8 \cdot 10^7$ 1/Ом·м.

Для определения распределения мощности тепловых потерь в стенках резонатора использована методика из статьи [3]. На первом этапе был проведен электростатический расчет распределения напряженности электрического поля между электродами. Для этого в электростатическом расчете между электродами задавалась разность потенциалов, обеспечивающая квадрупольное распределение напряженности электрического поля в соответствие со схемой подключения, представленной на рис. 2.

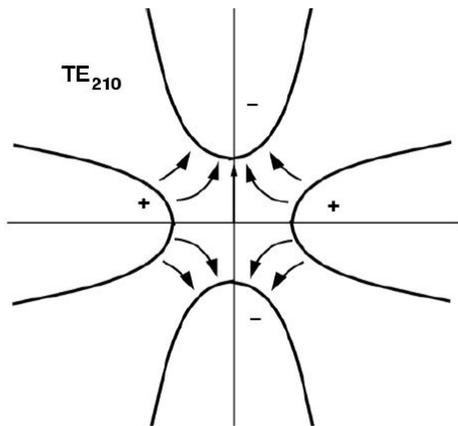


Рис.2. Вид квадрупольного распределения напряженности электрического поля

Исходя из полученной амплитуды напряженности электрического поля между электродами, определялся коэффициент, используемый при расчете тепловых потерь:

$$K = \left(\frac{E_{static}}{E_{em}} \right)^2, \quad (1)$$

где E_{static} – амплитуда напряженности электрического поля, определенная в электростатическом расчете; E_{em} – амплитуда напряженности электрического поля, определенная в расчете на собственных модах.

Путем умножения распределения мощности тепловых потерь, полученного в электродинамическом расчете на собственных модах, на полученный коэффициент K рассчитано распределение мощности тепловых потерь в резонаторе (рис. 3).

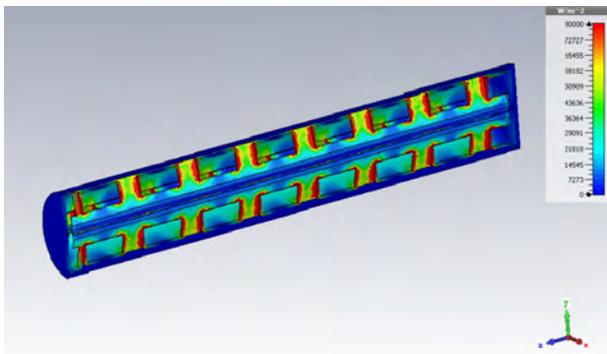


Рис.3. Распределение тепловых потерь в модели 4К-резонатора с окнами связи

Результат расчета показал, что в 4К-резонаторе с ПОКФ для рабочей частоты 162 МГц суммарные потери мощности в стенках составляют 185 кВт.

Из рис. 3 видно, что максимальные потери сосредоточены на торцах окон связи и на краях лопастей резонатора.

Основные параметры рассчитанной структуры представлены в табл. 1.

Таблица 1

Основные параметры четырехкамерного резонатора

Параметр	Величина
Тип ускоряемых частиц	p^+
Входная энергия, кэВ	47
Выходная энергия, МэВ	2.15
Длина резонатора, мм	2460
Внутренний диаметр резонатора, мм	342
Внешний диаметр резонатора, мм	380
Толщина стенок резонатора, мм	19
Высота окон связи, мм	90
Ширина окон связи, мм	213
Количество окон в одной лопасти, шт.	7,5
Рабочая частота, МГц	162
Напряжение между электродами, кВ	120
Добротность	11300
Мощность потерь, кВт	185

Тепловой расчет

В первом случае проводился расчет температурных распределений в модели резонатора без активного водяного охлаждения. На рис. 4 представлены результаты расчета температурных распределений в 3D-модели 4К-резонатора.

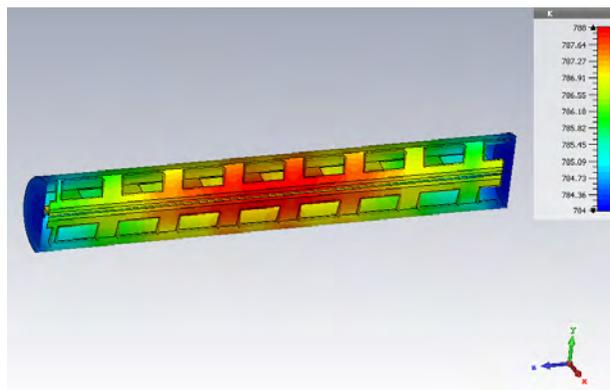


Рис. 4. Температурные распределения в 3D-модели 4К-резонатора

Следует отметить, что области с максимальной температурой находятся в районе окон магнитной связи и приторцевых областях. Из рис. 4 видно, что максимальная равновесная температура составляет 788 К. Такие высокие температуры могут приводить

Основные параметры каналов охлаждения

Расположение канала	Диаметр, мм	Количество, шт
Каналы вокруг окон магнитной связи	12	28
Каналы в приторцевых областях	9	4
Продольные каналы в корпусе резонатора	12	8

Таблица 3

Основные параметры материалов, используемые в тепловом расчете

Параметр	Значение
Теплопроводность корпуса резонатора (нержавеющая сталь), Вт/К/м	82,5
Теплоемкость (нержавеющая сталь), кДж/К/кг	0,465
Излучательная способность (нержавеющая сталь)	0,67
Коэффициент теплоотдачи (нержавеющая сталь), Вт/м ² /К	5,6
Теплопроводность воды, Вт/К/м	0,6
Теплоемкость воды, кДж/К/кг	4,2

к изменению геометрии (деформации) корпуса резонатора, изменению распределения электромагнитного поля внутри него и, как следствие, к сдвигу частот электромагнитных волн внутри резонатора и падению добротности. Следовательно, для обеспечения термостабилизации ускоряющей структуры необходимо водяное охлаждение [4].

Для оптимальной термостабилизации резонатора в наиболее теплонагруженных областях обычно высверливают каналы для водяного охлаждения. Поэтому для снижения равновесной температуры в модель резонатора были внедрены трубки охлаждения. Форма каналов водяного охлаждения была выбрана таким образом, чтобы решить проблему перегрева электродов. Существует несколько способов улучшить эффективность охлаждения, например, увеличить диаметр или сделать водяной канал ближе к поверхности лопасти резонатора. Кроме этого, каналы водяного охлаждения можно просверлить вокруг окон связи, так как основные области, подвергающиеся сильным тепловым нагрузкам, находятся вблизи их краев. Трехмерная модель резонатора с каналами охлаждения показана на рис. 5 и 6.

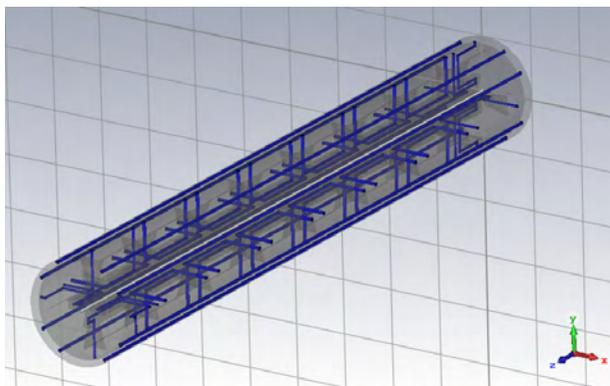


Рис. 5. 3D-модель 4К-резонатора с активным водяным охлаждением

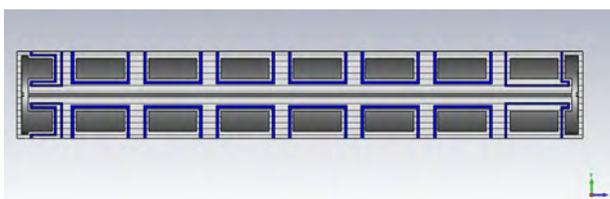


Рис. 6. 3D-модель 4К-резонатора с активным водяным охлаждением в разрезе

Модель имеет 40 каналов водяного охлаждения. Температура охлаждающей воды – 20 °С. Температура окружающей среды – 21 °С. В табл. 2 представлены основные параметры каналов.

Коэффициент теплоотдачи воды рассчитывался по формуле [5]:

$$\alpha = 350 + 2100\sqrt{v}, \quad (2)$$

где v – скорость водяного потока, м/с.

Другие параметры материалов, используемые в тепловом расчете, представлены в табл. 3.

Проведена серия тепловых расчетов при различных скоростях водяного потока. Результаты термодинамических расчетов приведены в табл. 4.

Таблица 4

Результаты расчетов для различных скоростей потока воды

Параметр	Значение				
	2,5	3	3,5	4	4,5
Скорость, м/с	2,5	3	3,5	4	4,5
Общий расход воды, л/мин (во всех каналах охлаждения)	649	776	906	1037	1166
Коэффициент теплоотдачи α , Вт/м ² /К	3668	3983	4277	4550	4802
Максимальная температура корпуса резонатора, К	336,5	334	333,8	333,8	333,8

Как видно из табл. 4, оптимальный вариант соответствует скорости водяного потока 3 м/с. При этом обеспечивается минимальная равновесная температура в корпусе резонатора при оптимальном расходе воды, который составляет 776 л/мин. Дальнейшее увеличение расхода не приводит к заметному снижению равновесной температуры. Устойчивое температурное распределение показано на рис. 7.

Как видно из рис. 7, максимальная равновесная температура в корпусе резонатора при скорости водяного потока 3 м/с составляет 334 К, а максимальная температура лопастей резонатора – 330 К.

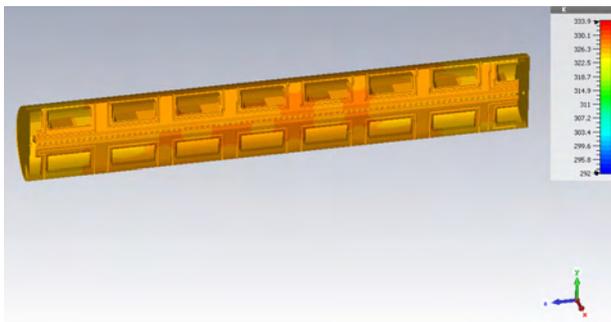


Рис. 7. Результат полученных температурных распределений в 4К-резонаторе с активным водяным охлаждением при скорости водяного потока 3 м/с

Необходимо отметить, что пиковая равновесная температура в модели резонатора с активным водяным охлаждением на 454°K меньше, чем в модели резонатора без охлаждения.

Заключение

При проектировании ускорителей с ПОКФ работающих в непрерывном режиме необходимо учитывать тепловые потери в стенках резонатора.

В работе проведен расчет распределения мощности тепловых потерь в 4К-резонаторе с ПОКФ с магнитными окнами связи. Результаты расчета показали, что средняя мощность тепловых потерь в стенках 4К-резонатора составила 185 кВт.

Проведен расчет температурных распределений в модели резонатора без активного водяного охлаждения. Получена равновесная температура, равная 788 К. Исходя из чего, сделан вывод о том, что необходимо предусмотреть активное водяное охлаждение, так как такие высокие температуры приводят к изменению геометрии резонатора и сдвигу резонансной рабочей частоты.

Построена модель 4К-резонатора с магнитными окнами связи с каналами охлаждения. Проведена серия тепловых расчетов резонатора при различных

скоростях потока воды в каналах. Результаты расчета показали, что при скорости потока воды равной 3,5 м/с и выше максимальная температура корпуса резонатора не изменяется. В результате чего был выбран вариант, который соответствует скорости потока воды равной 3 м/с, поскольку он имеет меньший расход воды 776 л/мин и приемлемую равновесную температуру внутренних поверхностей резонатора (до 334 К). Полученные результаты будут использоваться в дальнейшем для оптимизации конструкции и проведения дополнительных термодинамических расчетов.

Стоит отметить, что для оценки влияния тепловых потерь на электродинамические характеристики резонатора необходимо проводить расчет деформации корпуса резонатора. Данный расчет должен показать, достаточны ли выбранная скорость потока воды в каналах охлаждения и конфигурация каналов для сохранения геометрии корпуса резонатора, и, как следствие, его электродинамических характеристик (рабочая частота, добротность, шунтовое сопротивление, мощность тепловых потерь) в заданных диапазонах.

Литература

1. Капчинский И. М. Теория линейных резонансных ускорителей. Динамика частиц. М.: Энергоиздат, 1982. С. 130–144.
2. Qi Fu, Kun Zhu, Yuanrong Lu, Zhi Wang et al. Study for a 162,5 MHz window-type RFQ // Proceedings of IPAC2016. 2016. P. 423–425.
3. Qi Fu, Kun Zhu, Yuanrong Lu, Zhi Wang et al. Progress of a 162,5 MHz high-current RFQ with coupling windows // Proceedings of LINAC2016. 2016. P. 589–591.
4. Polozov S. M., Lozeev Y. Y. Thermodynamics simulation for the CW radio-frequency quadrupole accelerator // Proceedings of RuPAC2018. 2018. P. 282–284.
5. Кухлинг Х. Справочник по физике: Пер. с нем. М.: Мир, 1983. С. 520.