

ЮСТИРОВКА И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ВЧ НАСТРОЙКА СЕКЦИИ ТИПА АЛЬВАРЕЦА LINAC-4 SPL CERN

И. А. Юрьев, О. В. Забелин, Н. Н. Курапов, М. Л. Сметанин

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

Введение

Линейные резонансные ускорители протонов часто используются как инжекторы частиц в циклических ускорителях на высокие энергии. Одним из таких инжекторов является Linac-2 с выходной энергией частиц 50 МэВ, обеспечивающий инжекцию протонов в бустер протонного синхротрона, который в свою очередь представляет собой промежуточный бустер для Большого адронного коллайдера (БАК), расположенного в Европейском центре ядерных исследований (ЦЕРН). Последние несколько лет совместно с различными мировыми ядерными центрами разрабатывается и осуществляется проект ЦЕРН по модернизации существующей системы инжекторов БАК для улучшения характеристик пучков при столкновении в коллайдере. В частности, одним из звеньев проекта является замена устаревшего Linac-2 на линейный резонансный ускоритель протонов Linac-4, рассчитанный на выходную энергию частиц 160 МэВ и позволяющий получить улучшенные характеристики пучка частиц [1].

Повышение потока вторичных частиц, требуемого для различных физических экспериментов, может быть удовлетворено только путем использования пучков протонов повышенной мощности. Сверхпроводящий линейный ускоритель протонов (SPL), обеспечивающий среднюю мощность в пучке 4 МВт, рассматривается в CERN как потенциальная начальная часть к протонному драйверу нейтринной фабрики. SPL может также быть использован для реконструкции БАК и в проекте EURISOL для производства ионных пучков.

SPL будет состоять из источника ионов H⁺, секции с высокочастотной квадрупольной фокусировкой (RFQ) на энергию 3 МэВ, ускорителя с трубками дрейфа до 40 МэВ, участка с секциями со связанными резонаторами на энергию 120–160 МэВ и сверхпроводящего участка до энергии 2,2 ГэВ. «Теплая» часть ускорителя SPL может заменить действующий Linac-2 и названа Linac-4.

Для достижения параметров Linac-4 часть ускорителя, занятая секциями с трубками дрейфа, должна обеспечивать эффективное ускорение протонного пучка с током 30 мА, малые потери пучка, эффективное охлаждение и стабильную долговременную работу. Пучок должен быть согласован с последующими резонаторами участка со связанными резонаторами.

В рамках международного сотрудничества с ЦЕРН в московском Институте теоретической и экспериментальной физики (ИТЭФ) был разработан участок Linac-4, содержащий ускоритель с трубками дрейфа, и произведено численное моделирование секции, а также динамики пучка на всем протяжении Linac-4. В РФЯЦ-ВНИИЭФ выполнено численное моделирование электромагнитных и тепловых характеристик варианта секции, а также ее конструирование.

На данном этапе разработки макета ускоряющей секции Альвареца для проекта Linac-4 стоит задача «холодной» высокочастотной настройки секции и, в случае получения успешных результатов, конструкция секции может стать прототипом части создаваемого ускорителя.

Целью данной работы является прецизионная механическая юстировка трубок дрейфа на оптической оси секции Альвареца, «холодная» высокочастотная настройка секции на рабочую частоту, а также исследование влияния отклонения трубок дрейфа от оптической оси секции, на резонансные частоты устанавливаемых в резонаторе собственных электромагнитных колебаний.

Юстировка макетов трубок дрейфа

Для того, чтобы подготовить резонатор Альвареца к выполнению «холодной» ВЧ настройки, требовалось установить на оси секции 27 трубок дрейфа. Необходимо было установить трубки дрейфа с отклонением от оси не более 100 мкм и относительно друг друга не более 50 мкм. Юстировка выполнялась с использованием оптического метода визирования с помощью нивелира. В качестве оснастки для юстировочных работ использовались проволочные перекрестия и металлические диски с центровыми отверстиями. Толщина проволоки перекрестия составляла 70 мкм и определялась видимостью на максимальном расстоянии визирования. Был использован следующий список монтажных и измерительных операций (схема юстировки представлена на рис. 1):

– С помощью проволочных перекрестий во входном и выходном отверстиях торцевых крышек и реперной точки, закрепленной на стене помещения, находилась геометрическая ось резонатора, на которую выставлялся юстировочный нивелир. Таким образом была найдена ось визирования внутри резона-

тора, которая должна была стать оптической осью для всех макетов трубок дрейфа.

– На визирную ось нивелира был выставлен макет первой трубки дрейфа, который позже использовался в качестве реперной точки (рис. 2). Торцевая крышка с входным отверстием при этом была снята.

– Положение выставяемой трубки дрейфа регулировалось с помощью юстировочного узла (рис. 3). Во время юстировки трубка могла изменять свое положение в пяти степенях свободы. В конечном положении трубка поджималась фланцем и фиксировалась быстросохнущим раствором с минимальной усадкой объема.

Точность измерения отклонений трубок дрейфа от оси определялась толщиной проволоки перекрестий, толщиной визирных линий, стабильностью температуры окружающей среды, отсутствием вибраций пола и механическими свойствами устройства крепления трубок дрейфа.

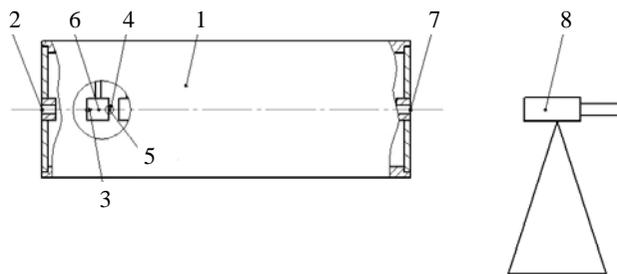


Рис. 1. Схема юстировки трубок дрейфа в резонаторе ускорителя Альвареса: 1 – кожух резонатора; 2 – задняя реперная мишень; 3 – задний юстировочный диск с малым отверстием; 4 – передний юстировочный диск с большим отверстием; 5 – апертурный репер; 6 – трубка дрейфа; 7 – передняя реперная мишень; 8 – юстировочный нивелир

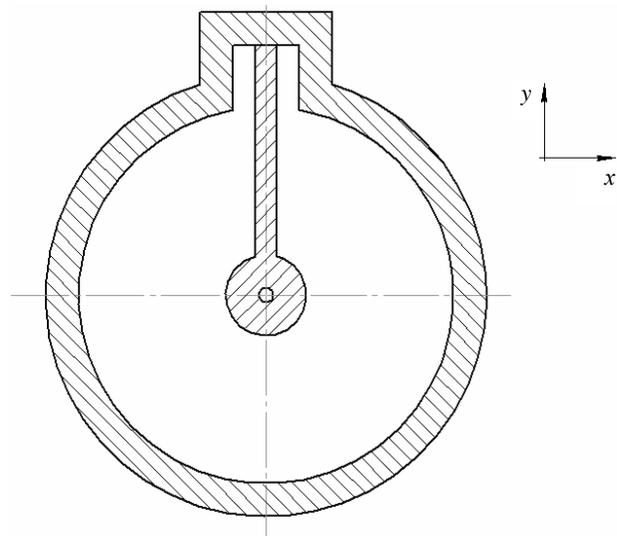


Рис. 2. Схематическое изображение положения первой трубки дрейфа относительно оси

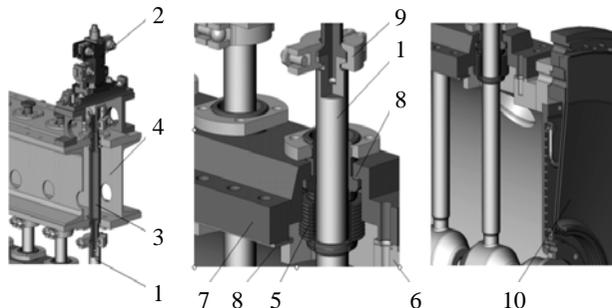


Рис. 3. Конструкция крепления трубки дрейфа на корпусе резонатора: 1 – трубка дрейфа; 2 – узел юстировки; 3 – фиксирующий узел трубки дрейфа; 4 – несущая балка; 5 – сильфон; 6 – корпус резонатора; 7 – крышка; 8 – медное уплотнение; 9 – хомут; 10 – соединяющий узел

После установки трубок дрейфа контрольные измерения выявили необходимость дополнительной юстировки, после чего большинство трубок установлены с отклонением не более 70 мкм. Заключительные результаты юстировки трубок дрейфа представлены на рис. 4, 5.

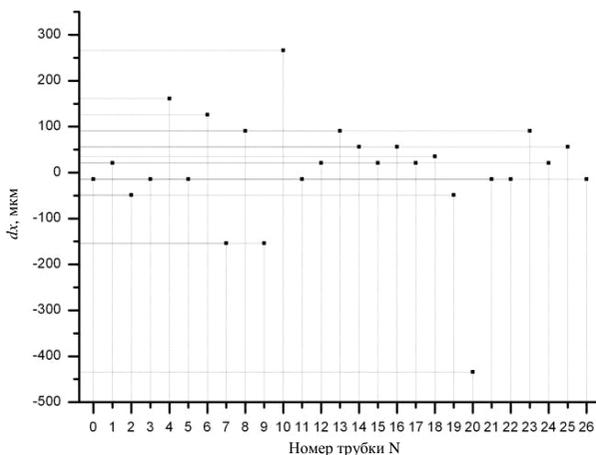


Рис. 4. Отклонения трубок дрейфа от оси в поперечном направлении X

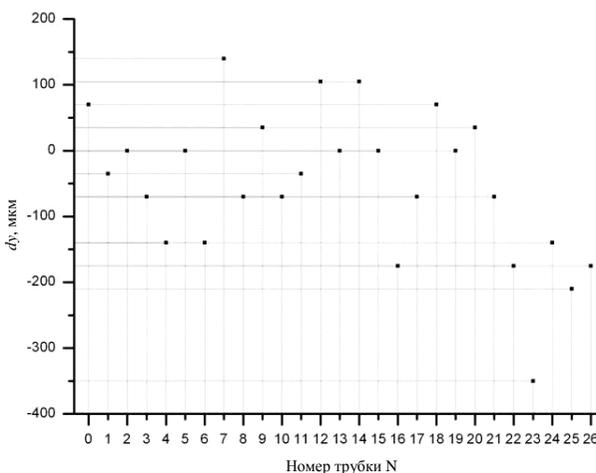


Рис. 5. Отклонения трубок дрейфа от оси в поперечном направлении Y

После «холодной» ВЧ настройки резонатора Альвареца трубка № 10, расчет для которой проводился в программном пакете для численного трехмерного моделирования ЭДХ, была выведена из фиксированного положения. С ней был проведен эксперимент по выявлению влияния отклонения трубки дрейфа на резонансную частоту секции.

В заключение стоит указать, что для проведения работ по юстировке с такой точностью требуется специализированное помещение со стабилизированной температурой. При конструкции ускорительной секции лучше учитывать, что доступ в резонатор секции должен быть легким для упрощения механических работ.

Компьютерный расчет ускорительной секции

Компьютерный расчет помог определить типы колебаний, устанавливающиеся в ускорительной секции Альвареца, выделить рабочий тип колебаний (E_{010}) и получить распределение продольной компоненты электрического поля. Расчеты производились на вычислительной машине, оснащенной двумя четырехядерными процессорами IntelXeon частотой 2,27 ГГц и 12 Гб оперативной памяти, в программном пакете для трехмерного моделирования ЭДХ.

Модель ускоряющей структуры с трубками дрейфа была построена на основании чертежей реальной секции с некоторыми допущениями в геометрии трубок дрейфа (рис. 6). Размеры соблюдены с точностью от 10 до 100 мкм для разных элементов конструкции.

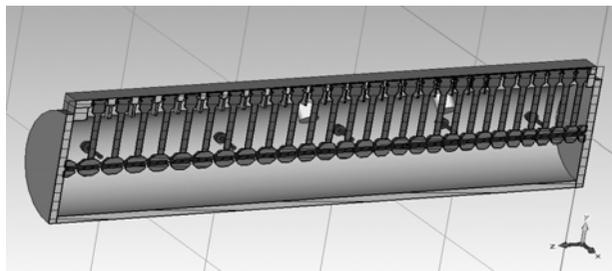
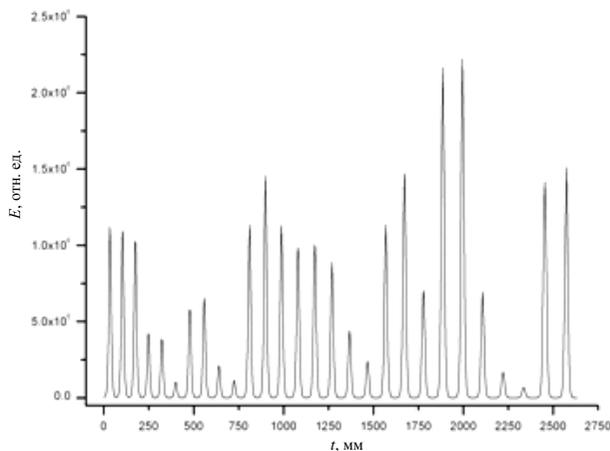


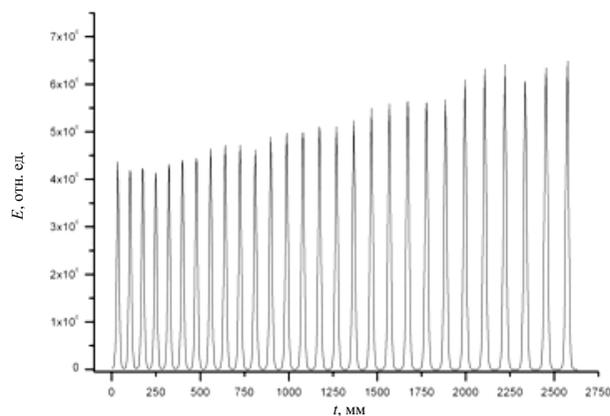
Рис. 6. Модель резонатора типа Альвареца в программном пакете для трехмерного моделирования ЭДХ

В результате расчетов вдоль оси резонатора были получены распределения продольной составляющей электрического поля трех типов колебаний с частотой, близкой к проектной (рис. 7). Из них видно, что разность напряженности электрического поля в соседних зазорах между трубками дрейфа ускорительной секции может достигать 4 % и более. На основе анализа магнитного поля был предложен способ определения частоты, принадлежащей рабочему виду колебаний, заключающийся в том, что свободные отверстия в корпусе, предназначенные для датчиков, можно использовать в качестве ввода и вывода ВЧ мощности для диагностики установившихся в резонаторе колебаний (рис. 10). Исходя из полученного теоретического

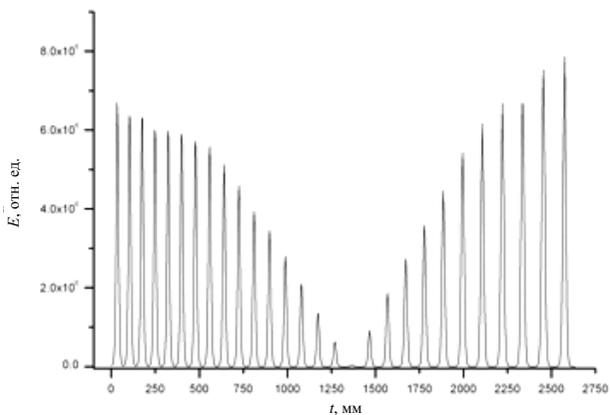
распределения полей, вблизи центрального отверстия в корпусе, в отличие от ускоряющей моды колебаний (с частотой 352 МГц), силовые линии магнитного поля на частоте 355 МГц меняют свое направление на противоположное (рис. 8, 9). Таким образом, на снятой экспериментально амплитудно-частотной характеристике мода колебаний с резонансной частотой 355 МГц должна иметь близкую к нулю амплитуду.



а



б



в

Рис. 7. Распределение амплитуды напряженности электрического поля на оси резонатора на частоте 349 МГц (а), 352 МГц (б) и 355 МГц (в)

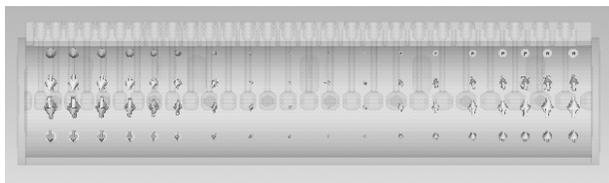


Рис. 8. Силовые линии магнитного поля в резонаторе DTL1 на частоте 355 МГц. Результат расчета в программном пакете для трехмерного моделирования ЭДХ

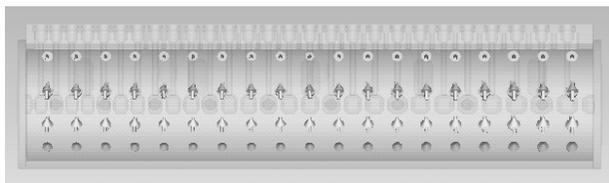


Рис. 9. Силовые линии магнитного поля в резонаторе DTL1 на частоте 352 МГц. Результат расчета в программном пакете для трехмерного моделирования ЭДХ

Настройка и экспериментальное измерение ЭДХ ускорительной секции

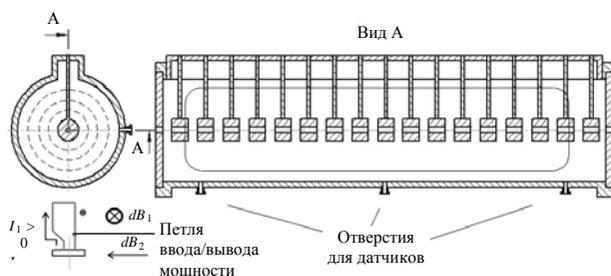


Рис. 10. Поперечное и продольное сечения ускорительной секции и эскиз питающей петли. Пунктирными линиями указано направление векторов магнитного поля E -волны, тонкими сплошными линиями – направление векторов магнитного поля H -волны

Для измерения амплитудно-частотной характеристики ускорительной секции использовался анализатор цепей E5071C фирмы Agilent Technologies, предназначенный для измерения s -параметров цепей. Анализатор имеет свип-генератор с полосой измеряемых частот от 0,1 до 4500 МГц, каналы ввода и вывода низкоомного сигнала СВЧ, которые подключались к петлям ввода и вывода соответственно. Петли вводились в отверстия корпуса резонатора, предназначенные для датчиков.

При прохождении через плоскость питающей петли переменного магнитного потока в петле возникает ток. Соответственно, в силу направлений магнитных полей, указанных на рис. 10, питающая петля реагирует на E -волну, если она ориентирована в продольной плоскости, а на H -волну – при ориентации петли в поперечной плоскости резонатора. Петли для измерения рабочего типа колебаний ориентировались в продольной плоскости резонатора. Всего было об-

наружено порядка 600 резонансных частот в полосе от 100 до 2000 МГц. Исходя из теоретических данных, близкими по параметрам к ускоряющей моде были три типа колебаний с частотами 349, 352 и 355 МГц. Экспериментальное измерение амплитудно-частотных характеристик показало хорошее совпадение с расчетными характеристиками, из чего можно было предположить, что тип колебаний с частотой 352 МГц является рабочим типом колебаний E_{010} . К тому же, при расположении выходной петли в среднем отверстии секции амплитуда выходного сигнала одной из мод уменьшалась практически до нуля (что подтвердило теоретическое предположение, указанное на рис. 7,в), а при ориентации петли в поперечной плоскости резонатора амплитуды всех трех частот спадали до нуля.

Подстройка резонансной частоты осуществлялась с помощью подвижных плунжеров (поршней). Были сняты зависимости частоты резонатора на рабочем типе колебаний от глубины погружения плунжеров. Полученные характеристики показали, во-первых, что поршни изменяют частоту резонатора максимум на (256 ± 3) кГц, а во-вторых, что каждый поршень оказывает одинаковое влияние на частоту порядка 127 кГц (на рис. 11 показана характеристика для обоих плунжеров). С помощью этих данных частота рабочего типа колебаний была настроена на $(352,200 \pm 0,002)$ МГц. Экспериментально было определено, что при изменении температуры окружающей среды на 10°C рабочая частота может изменяться в пределах $(352,200 \pm 0,050)$ МГц.

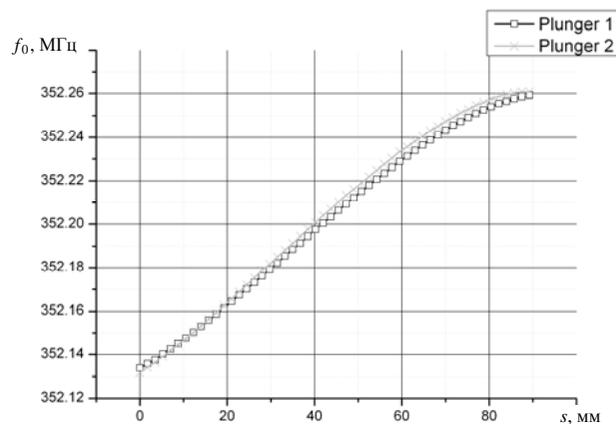


Рис. 11. Влияние глубины погружения плунжеров на частоту рабочего типа колебаний

После предварительного определения и подстройки частоты рабочего типа колебаний резонатора было выполнено измерение распределения его продольной компоненты электрического поля вдоль оси резонатора ускорительной секции (рис. 13) методом малых возмущений [3]. Для этого были изготовлены петли ввода и вывода ВЧ мощности (рис. 10) и медный цилиндр (длиной 6,55 мм и диаметром 3,55 мм), используемый в качестве пробного тела.

Медный цилиндр, закрепленный на натянутой леске, протягивался через ось структуры. Как показано на схеме (рис. 12), леска (4) натягивалась на четыре колеса (1). Перемещение медного цилиндра (3) осуществлялось вручную и регистрировалось с помощью линейки (2) и стрелки (5), закрепленной на леске.

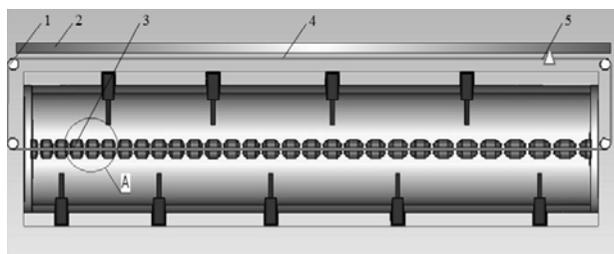


Рис. 12. Схема оснастки для измерения ЭДХ ускорительной секции Альвареца методом малых возмущений

Измеренные распределения продольного электрического поля на оси резонатора для двух соседних типов колебаний в полосе частот, близких к частоте рабочего типа колебаний, подтвердили предположение, выдвинутое при анализе численных расчетов. В результате было выяснено, что тип колебаний E_{010} имеет проектную рабочую частоту 352 МГц, а ближайшая частота 355 МГц имеет тип колебаний E_{011} . На рис. 13 представлены результаты измерений распределения продольного электрического поля на оси резонатора для типа колебаний E_{010} на рабочей частоте в сравнении с теоретическим распределением, полученным в расчетной части данной работы. Измеренное и теоретическое распределения имеют одинаковое количество вариаций электрического поля в продольном направлении ускорительной секции.

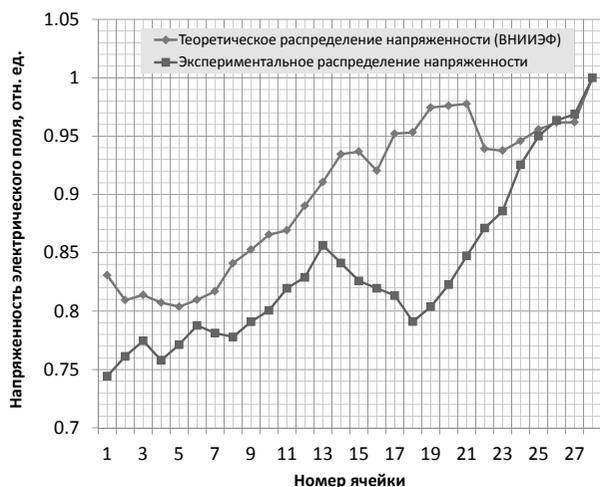


Рис. 13. Распределение амплитуды напряженности продольного электрического поля вдоль оси резонатора Альвареца. Посткаплеры отсутствуют

Заключительный этап исследований, проведенных на резонаторе с трубками дрейфа и посткаплерами, представляет собой эксперимент по выявлению влияния отклонения трубок дрейфа от оси резонатора на резонансную частоту рабочего типа колебаний. Для проведения эксперимента трубка № 10 была выведена из фиксированного положения. С помощью юстировочного устройства трубка дрейфа перемещалась в поперечном направлении X и Y на некоторые расстояния от оси резонатора. Каждое положение трубки определялось с помощью нивелира, а изменение частоты – с помощью анализатора цепей. Полученные данные представлены на рис. 14, 15.

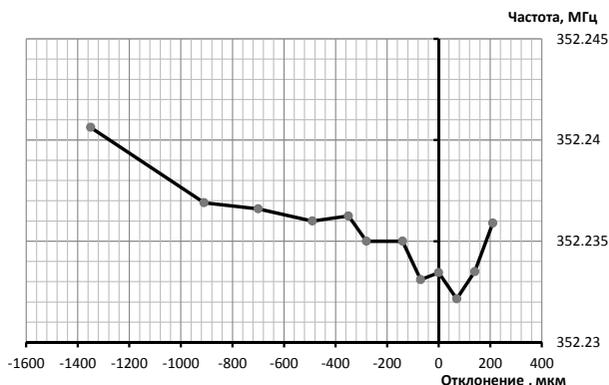


Рис. 14. Экспериментальная зависимость резонансной частоты типа колебаний E_{010} от смещения трубки дрейфа № 10 в поперечном направлении X

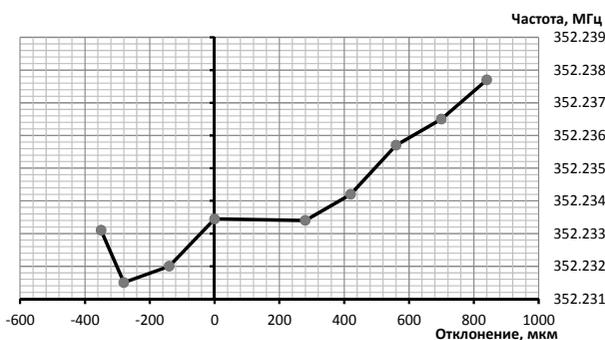


Рис. 15. Экспериментальная зависимость резонансной частоты типа колебаний E_{010} от смещения трубки дрейфа № 10 в поперечном направлении Y

Заключение

В ходе работы была проведена установка и юстировка трубок дрейфа в резонаторе ускорительной секции типа Альвареца, а также проведены предварительные расчеты электромагнитных полей в секции, использующиеся в ВЧ настройке. В заключение

была проведена «холодная» ВЧ настройка резонатора и исследования по влиянию смещений трубок дрейфа на резонансную частоту рабочего типа колебаний в секции. Проведено измерение продольной составляющей электрического поля основного вида колебаний на оси резонатора ускоряющей секции.

На основании полученных в работе результатов можно сделать вывод о том, что юстировка трубок дрейфа и «холодная» ВЧ настройка резонатора Альвареца проведены успешно. Отклонение резонансных частот ячеек структуры от номинальной уменьшено с помощью посткаплеров. Сглаживание разностей напряженности электрического поля в ячейках вдоль структуры до требуемой величины (равной 1 %) должно производиться с помощью посткаплеров с возможностью продольного хода или концевыми петлями.

Литература

1. Gerigk F., Baylac M., E. Benedico Mora. Conceptual design of the SPL II. A high-power superconducting H^- linac at CERN. CERN-2006-006, 12 July 2006.
2. Telnov A. V. Design status of first section of prototype of Alvarez DTL tank for the project SPL CERN // Proc. of the 43rd ISTC Japan Workshop on Accelerator Sciences. Tsukuba, 2007. P. 57–62.
3. Вальднер О. А., Собенин Н. П., Зверев Б. В., Щедрин И. С. Диафрагмированные волноводы: Справочник. М.: Энергоатомиздат, 1991.
4. Лебедев И. В. Техника и приборы СВЧ: Учебник для студентов вузов по специальности «Электронные приборы» / Под ред. Н. Д. Девяткова. М.: Высшая школа, 1970.
5. Проект МНТЦ № 2888.