

Линейный ускоритель электронов для ядерной геологии

Б.Ю. Богданович, В.И. Каминский, А.В. Нестерович

Московский государственный инженерно-физический институт, Россия

Одним из эффективных методов определения количества полезных ископаемых является гамма-каротаж с помощью опускаемого в скважину источника излучения. Наиболее мощным источником тормозного излучения, используемого в данном методе, является линейный ускоритель электронов. К такому ускорителю предъявляются специальные требования, важнейшими из которых являются малые поперечные габариты (диаметр не более 14 см) и обеспечение надежной работы при высоких температурах (до 180°C). Применение стандартных СВЧ-генераторов для питания ускоряющей системы ограничено из-за отсутствия серийных ламп, обладающих малыми поперечными габаритами и способных работать при повышенных температурах.

Решение данной задачи возможно с помощью создания генераторно-ускорительной системы [1], включающей в себя две секции на основе бипериодической замедляющей структуры. В первой секции инжектированный пучок электронов генерирует ВЧ-энергию, которая передается во вторую секцию, расположенную соосно с первой. В этой секции осуществляется ускорение пучка электронов до заданной энергии. Обе секции работают в одинаковых тепловых условиях, поэтому отсутствует взаимная расстройка их резонансных частот при изменении внешней температуры. При этом стоимость изготовления и настройки секций, содержащих значительное число ячеек, достаточно велика и в значительной степени определяет стоимость всей системы.

Упрощение конструкции генераторно-ускорительного модуля может быть осуществлено с помощью применения принципа ускорения электронов несинхронными электромагнитными волнами в гладком призматическом либо цилиндрическом резонаторе, на который наложено продольное нарастающее вдоль оси резонатора магнитное поле [2]. Теоретическое обоснование такого метода ускорения проведено в ряде публикаций, в частности, в работе [3]. При этом достаточно сложные замедляющие системы заменяются полыми резонаторами простой формы, возбуждаемыми на низших типах волн. Для призматического резонатора этим типом является TE_{10n} , для цилиндрического — TE_{11n} . Здесь n — число вариаций поля вдоль продольной оси резонатора.

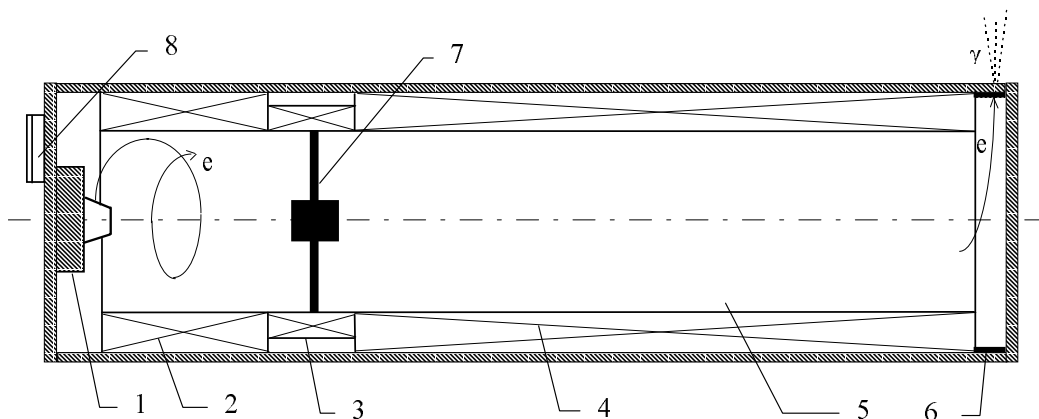


Рис. 1: Функциональная схема генераторно-ускорительного модуля: 1 – источник электронов; 2 – соленоид генераторного узла; 3 – буферный соленоид; 4 – соленоид ускорительного узла; 5 – полный резонатор (призматический либо цилиндрический); 6 – конверсионная мишень; 7 – коллектор электронов с держателями; 8 – вводы высоковольтного питания источника электронов и питания соленоидов.

На рис. 1 представлена функциональная схема ускорительно-генераторного модуля. Пучок электронов инжектируется в резонатор и движется по спиральной траектории, группируясь в сгустки и передавая энергию ВЧ-полю. Механизм передачи энергии аналогичен механизму отбора энергии от пучка электронов по методу, применяемому в мазерах на циклотронном резонансе (приборах типа гиромонотрона). Эффективное взаимодействие частиц с полем достигается при совпадении частоты циклотронного резонанса с собственной частотой резонатора. Для обеспечения необходимой мощности энергия электронов должна составлять не менее 50 кэВ, ток пучка — 40 А. Ограничение энергии инжекции определяется трудностями, возникающими при передаче высоковольтных импульсов по кабелю значительной длины. Технически реализуемой является транспортировка импульсов с амплитудой до 80 кВ. Эта величина была принята при расчетах.

На выходе генераторной части модуля осуществляется коллимация пучка и транспортировка его в ускоряющий резонатор. Как показывают расчеты, при ВЧ-мощности около 1 МВт, магнитном поле, изменяющемся от 0,06 до 0,14 Тл (см. рис. 2), энергия пучка на длине резонатора 1,15 м возрастает до 0,8 МэВ. Ток пучка при этом составляет несколько миллиампер. Расчеты проведены для призматического резонатора с поперечными размерами 72 на 44 мм и для цилиндрического резонатора диаметром 84 мм.

Сопоставление простоты изготовления и удобства эксплуатации двух вариантов генераторно-ускорительного модуля показывает следующее. Призматический резонатор имеет меньший объем, что обеспечивает упрощение откачки до рабочего вакуума. Однако добротность такого резонатора ниже, чем цилиндрического. Поперечное сечение соленоидов имеет прямоугольную форму, изготовление соленоидов с таким поперечным сечением сложнее, чем с круговым поперечным сечением для цилиндрических резонаторов. Модуль, построенный на основе цилиндрического резонатора, имеет поперечные размеры на несколько процентов больше, чем призматический, настроенный на ту же частоту. Окончательный выбор должен выполняться с учетом всех технических характеристик комплектующих приборов и изделий, входящих в состав системы.

Динамика пучка в обеих частях модуля мало чувствительна к изменению их резонансной частоты. Кроме того, поддержание равенства резонансных частот обеих частей модуля происходит автоматически, так как они находятся в одинаковых тепловых условиях. Связь между резонаторами может осуществляться через окна связи, размеры которых подбираются так, чтобы обеспечить максимальную передачу ВЧ-энергии из генераторной части модуля в ускоряющую. Генераторная и ускоряющая части модуля могут представлять собой единый резонатор. При этом держатели коллектора электронов (см. рис. 1) располагаются в плоскости, перпендикулярной плоскости поляризации электрического поля, чтобы минимально возмущать поле в резонаторе. Перевод частиц из тормозящей фазы поля в ускоряющую достигается с помощью коррекции магнитного поля буферным соленоидом и соответствующим выбором размеров коллектора, выполняющего роль дрейфового промежутка.

В настоящее время в МИФИ изготовлен и прошел испытания макет начальной части ускорителя. Отдельно проведены модельные испытания данного метода ускорения, подтвердившие возможность его реализации в полномасштабном варианте ускорителя. Ток инжектора электронов достигал 20 А при напряжении до 100 кВ, диаметр кольцевого лантанборидного катода — 30 мм, диаметр отверстия в катоде — 10 мм. На входе в генераторную секцию вращающийся поток электронов имеет диаметр около 20 мм. Длительность импульса — 80–100 мкс, частота посылок — 1 Гц. В настоящее время проводится численная оптимизация распределения магнитного поля по длине системы.

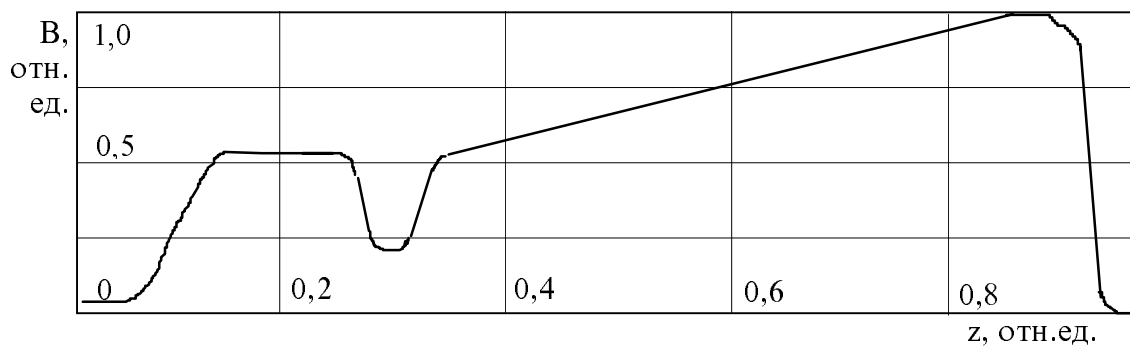


Рис. 2: Распределение магнитного поля вдоль оси генераторно-ускорительного модуля.

Список литературы

- [1] Bogdanovich B., Kaminsky V., Nesterovich A., Senyukov V. *Small-sized electron linear RF accelerator with beam auto acceleration for geology and industry*. Bulletin of American Physical Society, May 97, v. 42, № 3, p.1376.
- [2] Березин В.М., Буряк В.С. и др. *Электронные приборы СВЧ*. М.: Высшая школа, 1985.
- [3] Коломенский А.А., Лебедев А.Н. *Резонансные явления при движении частицы в плоской электромагнитной волне*. ЖЭТФ, 44, вып. 1, с. 261–269.