

## Реферат

### Сверхпроводящие циклотроны для медицинских применений и методы их проектирования

С.Б. Ворожцов, В.Л. Смирнов

Цикл работ включает 11 журнальных публикаций, посвященных проектированию и вводу в эксплуатацию сверхпроводящих циклотронов для медицинских применений.

Исследования, результаты которых описаны в выдвинутых на конкурс работах, объединяет направленность на разработку и применение методов моделирования сверхпроводящих циклотронов на этапах их проектирования и ввода в эксплуатацию в соответствии со следующими критериями:

- Проведение максимально реалистичных расчетов с целью получения наиболее точных результатов и минимизации времени, требуемого на ввод ускорителя в эксплуатацию;
- Использование инновационных физико-технологических решений, приводящих к созданию установки с параметрами, превосходящими все существующие мировые аналоги;
- Поддержка расчетами на этапе ввода установок в эксплуатацию.

В соответствии с поставленными целями были решены следующие задачи.

- Разработаны инновационные методы и алгоритмы проектирования циклотронных установок и разработаны комплексы программ, являющимися лучшими в мире. Этой части исследования посвящены работы [1-3];
- Спроектирован целый ряд сверхпроводящих циклотронных установок, среди которых есть как компактные машины, целью которых является производство медицинских изотопов [4-6], так и многофункциональные комплексы, предназначенные для проведения адронной терапии [7-9]. При проектировании систем циклотронов во внимание принимался имеющийся опыт существующих установок, находящихся на передовом крае развития циклотронной физики [10];
- Проведен цикл расчетов на этапе ввода циклотронов в эксплуатацию, включающий анализ измеренных карт полей и расчеты динамики пучка, целью которых было выяснение причин уменьшения интенсивности в процессе ускорения пучка и формулирования методов коррекции системы [11].

Все разработанные циклотронные установки, предназначенные для производства медицинских изотопов, являются уникальными, не имеющих работающих аналогов (изохронные сверхпроводящие циклотроны для производства медицинских изотопов). Существующие установки для производства изотопов базируются лишь на резистивных системах из-за существующих представлений об относительной сложности сверхпроводящих машин для указанных применений. Однако сотрудникам ЛЯП удалось, используя разработанные методики и проведя прецизионные расчеты, спроектировать ряд сверхпроводящих циклотронов, которые оказались выполненными на высоком уровне надежности и реализуемости. Ускорители выполнены с использованием кругоспиральных магнитных систем. Большая часть узлов установок оказалась значительно меньших размеров

по сравнению с соответствующими «теплыми» циклотронами. Детальная проработка систем при проектировании позволила разработать концептуальные проекты установок, которые могут служить основанием для технических проектов. Ответственной за производство и ввод в эксплуатацию стороной является компания Ionetix (США). Этот факт может быть объяснением того, что в некоторых работах в соавторах присутствуют сотрудники Ionetix. Вклад сотрудников ЛЯП заключается в разработке концептуальных проектов и является определяющим.

Спроектированные циклотроны нацелены как на производство изотопов для позитронно-эмиссионной томографии [4, 5], так и предназначены для получения крайне востребованных изотопов актиния  $^{225}\text{Ac}$  и астата  $^{211}\text{At}$  [6], которые могут быть введены в тело человека и, располагаясь в непосредственной близости от раковой опухоли, излучать альфа-частицы, убивающие злокачественное образование. Серия циклотронов включает в себя установки ION-12SC (протоны 12 МэВ), ION-15SC (протоны 15 МэВ), ION-20SC (протоны 17-20 МэВ) и ION-30SC (протоны и альфа-частицы 30 МэВ/нуклон). В настоящее время изготовлено семь циклотронов ION-12SC, три из которых установлены в медицинских центрах и используются по назначению. В этом ускорителе применяется уникальная запатентованная криогенная технология, при которой охлаждается не только обмотка, но и большая часть магнитопровода. За счет использования новых решений удалось создать изохронный циклотрон с самым высоким уровнем магнитного поля в мире (центральное поле 4.5 Тл) [5]. Размер установки в сборе всего  $0.8 \times 2.0 \text{ м}^2$ , а вес 2.3 тонны. За счет использования технологии сверхпроводимости потребляемая мощность всего 34 кВт. При этом потребительские качества установки (ток пучка до 25 мкА) превышают требования для производства изотопов. На этапе ввода циклотронов в эксплуатацию были обработаны десятки измеренных карт полей. Разработаны схемы коррекции паразитных гармоник поля и сформулированы методы устранения ошибок изготовления и сборки узлов. Спроектированные и установленные на циклотроны системы магнитных шимм значительно позволили поднять интенсивность ускоренного пучка [11]. Сравнение измеренных и расчетных средних полей циклотронов показали, что отклонение полей изготовленных магнитов от проектной величины не превышает долей процента.

Следующие циклотроны из этой серии, находящиеся на этапе проектирования, не только позволяют повысить конечную энергию пучка и расширить диапазон доступных изотопов, но и используют внешнюю инжекцию, что позволяет увеличить скорость наработки изотопов. По сути, это первые циклотроны со столь высоким магнитным полем и с внешней инжекцией [6]. При этом конструкция разработана таким образом, чтобы можно было использовать и внутреннюю инжекцию, что значительно упрощает систему и облегчает процесс изготовления установки и ввода её в эксплуатацию. Для изменения режимов работы необходима лишь замена центральной зоны циклотрона. Размеры и вес установки в несколько раз меньше производимых в настоящее время резистивных циклотронов.

Разработанный проект циклотронного комплекса, предназначенного для проведения адронной терапии, позволяет не только использовать радиационные методы лечения раковых опухолей, но и получать изотопы. Комплекс состоит из двух сверхпроводящих циклотронов. Циклотрон-инжектор [9] служит для ускорения протонов и ионов углерода  $^{12}\text{C}^{6+}$  с энергией 70 МэВ/нукл. Ускоренный пучок протонов при помощи развитой системы транспортировки частиц может быть проведен в отдельные помещения, где планируется осуществлять лечение меланомы глаза и рака кожи, а также производить медицинские изотопы. Ионы углерода инжектируются в основной секторный циклотрон для ускорения до энергии 400 МэВ/нукл [8]. Пучки углерода такой энергии используются для адронной терапии.

- [1] V. L. Smirnov, “Computer modeling of a compact isochronous cyclotron”, *Physics of Particles and Nuclei*, 2015, Vol. 46, No. 6, pp. 940–955.
- [2] V. Smirnov, “Computer codes for beam dynamics analysis of cyclotronlike accelerators”, *Physical Review Accelerators and Beams* 20, 124801 (2017).
- [3] В. Л. Смирнов, “Проектирование центральной зоны компактного циклотрона”, *Письма в ЭЧАЯ*, Т. 16, № 1, 2019, с. 40-55.
- [4] V. L. Smirnov, S. B. Vorozhtsov, and J. Vincent, “H– Superconducting cyclotron for PET isotope production”, *Physics of Particles and Nuclei Letters*, 2014, Vol. 11, No. 6, pp. 774–787.
- [5] V. Smirnov, S. Vorozhtsov, J. Vincent, “Design study of an ultra-compact superconducting cyclotron for isotope production”, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* 763 (2014) 6–12.
- [6] V. Smirnov, S. Vorozhtsov, X. Wu, and J. Vincent, “Innovative 20-MeV superconducting cyclotron for medical applications”, *Physics of Particles and Nuclei Letters*, 2019, Vol. 16, No. 6, pp. 899–906.
- [7] V. L. Smirnov and S. B. Vorozhtsov, “Magnetic system of a superconducting separated-sector cyclotron for hadron therapy”, *Physics of Particles and Nuclei Letters*, 2017, Vol. 14, No. 4, pp. 658–668.
- [8] V. L. Smirnov and S. B. Vorozhtsov, “Feasibility study of a cyclotron complex for hadron therapy”, *Nuclear Inst. and Methods in Physics Research*, A 887 (2018) 114–121.
- [9] V. Smirnov, S. Vorozhtsov, F. Taft, T. Matlocha, “Superconducting 70 AMeV cyclotron-injector for a hadron therapy complex”, *Nuclear Inst. and Methods in Physics Research*, A 934 (2019) 1–9.
- [10] V. Smirnov and S. Vorozhtsov, “Modern compact accelerators of cyclotron type for medical applications”, *Physics of Particles and Nuclei*, 2016, Vol. 47, No. 5, pp. 863–883.
- [11] V. Smirnov, S. Vorozhtsov, X. Wu, D. Alt, G. Blosser, G. Horner, J. Paquette, N. Usher, J. Vincent, and Z. Neville, “Experimental validation of the field and beam dynamics simulations for a superconducting cyclotron”, *Physics of Particles and Nuclei Letters*, 2020, Vol. 17, No. 2, pp. 204–210.