

**НОВЫЕ РЕШЕНИЯ УСКОРЕНИЯ  
И ТРАНСПОРТИРОВКИ ПУЧКОВ  
ДЛЯ ПРОТОННОЙ И ИОННОЙ ТЕРАПИИ  
(ПО МАТЕРИАЛАМ КОНФЕРЕНЦИИ  
PTCOG52, ЭССЕН, ИЮНЬ 2013 Г.)**

*М. М. Кац*<sup>1</sup>

Институт теоретической и экспериментальной физики, Москва

В обзоре кратко описано основное оборудование для современных и будущих центров протон-ной и ионной терапии.

Main equipment for contemporary and future centers of proton and ion therapy is described in this review.

PACS: 87.56.-v

**ВВЕДЕНИЕ**

Со 2 по 8 июня 2003 г. в г. Эссен (ФРГ) состоялась ежегодная конференция PTCOG52 (Particle Therapy Co-Operation Group), посвященная новым клиническим, радиобиологическим, физическим и информационным результатам в протонной и ионной лучевой терапии злокачественных новообразований.

В настоящее время в мире работают около 40 современных центров протонной терапии и около шести центров терапии пучками ионов. Каждый год входят в строй несколько новых центров протонной и ионной терапии, преобладают хорошо известные решения.

Всего лечение пучками протонов и ионов прошли уже более 110 000 пациентов.

Ускорители и каналы транспортировки пучков к пациенту являются с точки зрения пользователя — врача единым оборудованием. Оно должно быть максимально компактным, с минимальным электропотреблением, надежным и простым в эксплуатации, с возможностями выбирать направление облучения и активно (сканированием) оптимально распределять дозу в мишени сложной и переменной формы, обеспечивать высокую производительность и иметь доступную цену.

---

<sup>1</sup>E-mail: markmkats@gmail.com

Для облучения на глубину до 30 см надо использовать протоны с энергиями до 235 МэВ. В теплых магнитах ( $B < 1,6$  Тл) такие протоны поворачиваются с радиусом около 1,4 м. Современные центры протонной терапии имеют несколько процедурных комнат с гантри-установками, которые позволяют направлять пучок к неподвижно лежащему пациенту с оптимальных направлений. На рис. 1 показана типичная схема центра протонной терапии, основанная на применении теплого циклотрона и двух стандартных гантри фирмы ИВА. Каждая установка гантри для пучка протонов имеет габариты трехэтажного дома, прецизионно вращаемый вес более 100 т и стоит как половина ускорителя. При выделении полезного протонного пучка большая часть интенсивности теряется.

Аналогичный центр протонной терапии в г. Эссен с четырьмя гантри строился три года и вводился в эксплуатацию более двух лет.

Такое оборудование ориентировано на применение в большом онкологическом центре с большим потоком пациентов.

Вместо циклотрона иногда применяют синхротрон. Это более сложный ускоритель, но он способен выводить сразу протонный пучок с полезными параметрами. Синхротрон занимает примерно такую же площадь, как и циклотрон с системой выделения полезного пучка.

Наиболее полезные для медицины ионы углерода для облучения на глубину до 30 см должны иметь энергию до 400 МэВ/нуклон. В теплых магнитах ( $B < 1,6$  Тл) эти ионы поворачиваются с радиусом около 4 м. Поэтому габариты, вес, мощность и стоимость оборудования для ионной терапии примерно в 3–6 раз выше, чем для протонной терапии. В качестве ускорителя ионов используют синхротрон с линейным предварительным ускорителем.

Единственное существующее гантри (рис. 2) для пучка ионов со стандартной магнитной оптикой на теплых магнитах в Гейдельберге (НИТ) начало облучать пациентов в начале 2013 г., через четыре года после запуска ускорителя и процедурных комнат с горизонтальными пучками. Причина задержки — очень громоздкая ( $13 \times 13 \times 27$  м) и очень тяжелая конструкция (вращаемый вес около 670 т).

В Японии, Германии, Китае, Австрии и Италии работают центры ионной терапии с фиксированными направлениями пучка. В Японии (НИМАС–NIRS) в 2012 г. начали работать для облучения ионами две новые процедурные комнаты с горизонтальными пучками.

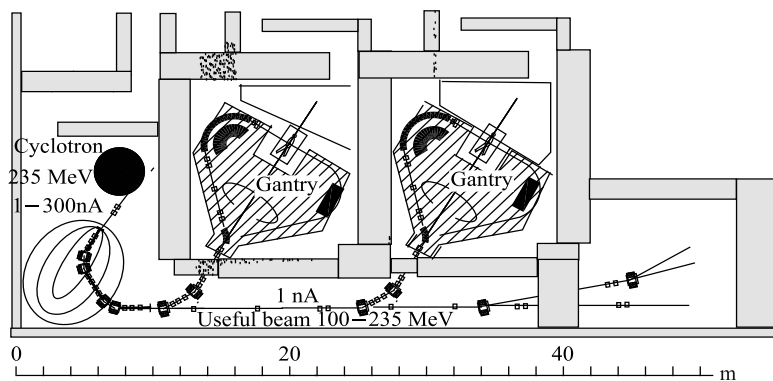


Рис. 1. Схема типовой центра протонной терапии

Для третьей процедурной комнаты начата разработка гантри на сверхпроводящих магнитах со стандартной магнитной оптикой (рис. 3). Габариты этой установки сравнимы с габаритами гантри на теплых магнитах для пучка протонов, радиус вращения пучка около 5,5 м, а ее вращаемый вес будет около 200 т. Ожидается окончание строительства этого гантри в 2016 г.

Оба решения гантри для пучка ионов имеют большие габариты, большой вращаемый вес и большую стоимость, поэтому вероятность их массового применения невелика. Проблема облучения ионами с разных направлений при помощи стандартных изоцентрических гантри пока не решена.

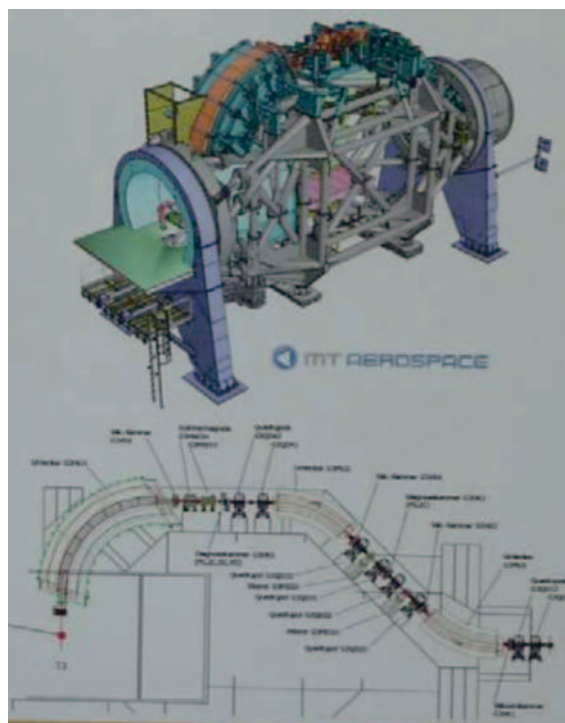


Рис. 2. Схема гантри для пучка ионов на теплых магнитах (HIT)

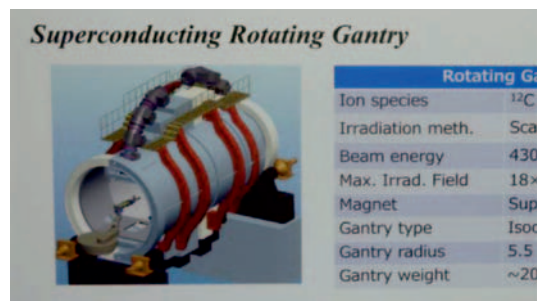


Рис. 3. Эскиз предложенного гантри для пучка ионов со сверхпроводящими магнитами

## НОВЫЕ ТРЕБОВАНИЯ И РЕШЕНИЯ

Среди новых требований к оборудованию для протонной и ионной терапии — минимизация периода освоения оборудования (сейчас этот период составляет несколько лет!) и создание максимально компактных и недорогих центров облучения с одной процедурной комнатой — однокабинных комплексов — для небольших онкологических центров.

Фирмы IBA и VARIAN представили похожие проекты. Оба проекта основаны на использовании циклотрона и гантри, но без отдельной системы выбора полезного пучка. Этот выбор осуществляется на базе первого поворота пучка в самом гантри.

На рис.4 показана схема оборудования для компактного центра фирмы IBA. Выведенный из циклотрона в направлении оси вращения гантри и в направлении на пациента протонный пучок с максимальной энергией сразу попадает в тормозящий фильтр. Полезный пучок вырезается из прошедшего через фильтр протонного пучка коллиматорами, фокусируется квадрупольными линзами, поворачивается первым магнитом и вырезается по энергии (по импульсу) следующим коллиматором. Затем полезный пучок фокусируется и поворачивается магнитами и линзами. Сканирующие магниты установлены до последнего магнита. Для уменьшения веса последнего магнита угол поворота в нем по сравнению с обычным гантри может быть уменьшен. Очевидно, что при таком расположении тормозящего фильтра и коллиматоров возникает необходимость эффективной защиты пациента от нейтронного фона. Эту проблему удалось решить при использовании композиционных материалов и при отказе от пассивной системы распределения дозы по мишени.

Другое решение компактного центра облучения протонами было предложено фирмой MEVION.

Оно основано на вращении на тяжелой раме сверхпроводящего циклотрона. Выходящий из циклотрона пучок протонов с энергией 230 МэВ направлен на пациента. При помощи тормозящих фильтров переменной толщины и коллиматоров пучок распределяется на объем мишени (рис. 5). Очевидно, что такая компактная система имеет трудности как с выделением и фокусировкой полезного пучка, так и с защитой пациента от нейтронного фона. Первый экземпляр такой установки был успешно сдан в эксплуатацию в начале 2014 г.

Интересный проект TULIP компактного оборудования для облучения протонами был представлен коллективом из ЦЕРН (рис. 6). Было предложено ускорять протоны сначала в маленьком циклотроне (до энергии 24 МэВ), а потом в линейном ускорителе с высоким темпом ускорения. Энергия протонов регулируется в пределах  $100 < E < 230$  МэВ выключением части ускорительных секций. Интенсивность пучка протонов регулируется источником циклотрона. Было предложено расположить линейный ускоритель на прямой ферме, у которой один конец зафиксирован на оси выведенного из циклотрона пучка (в направлении изоцентра), а другой конец перемещается вдоль окружности с радиусом

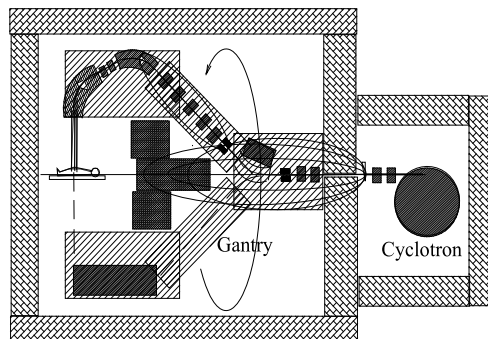


Рис. 4. Схема оборудования PROTEUS one для компактного протонного центра фирмы IBA

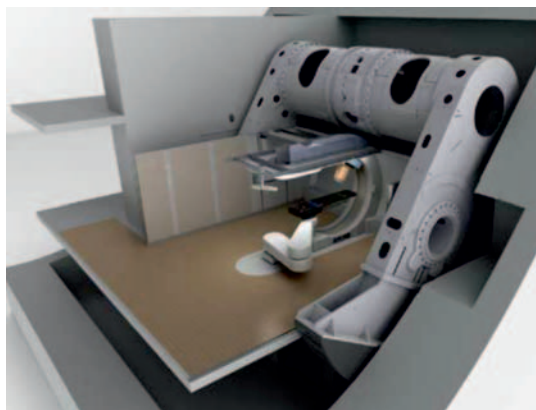


Рис. 5. Схема оборудования для компактного протонного центра фирмы MEVION

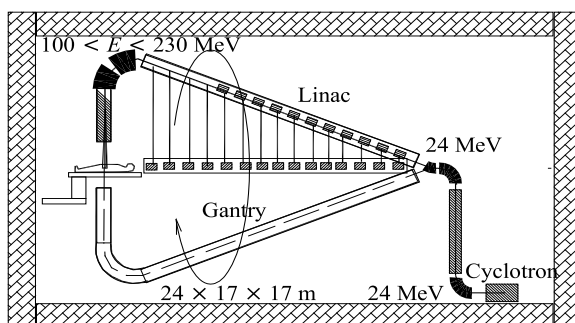


Рис. 6. Схема оборудования для протонной терапии, предложенная в ЦЕРН

около 5 м. В конце линейного ускорителя расположены магниты для поворота пучка к изоцентру, линзы для фокусировки пучка, сканирующие магниты и приборы. Таким образом, было предложено оборудование для компактного центра облучения протонами, совмещающее в себе ускоритель и гантри. Но когда это оборудование начнет использоваться, неизвестно.

Доклад «Concept of a compact gantry for laser based proton therapy» от группы OncoRay был посвящен возможностям использования мощного импульсного лазера для генерации пучка протонов и создания очень компактного оборудования для облучения. Пучок лазера направляется на мишень. Возникают разные вторичные частицы, в частности широкий по направлениям и с разными энергиями пучок протонов. Из этого пучка полезный пучок вырезается коллиматорами и магнитными линзами в первой части гантри. Затем полезный пучок протонов направляется к изоцентру магнитами и линзами, как в обычном гантри. Этот «концептуальный» проект далек от реализации. Для поворотов пучка протонов с радиусом около 0,5 м нужны сверхпроводящие магниты с полем более 4 Тл, которые будут сильно влиять на магнитную оптику этой системы. Аккуратное вырезание полезного пучка по фазовому объему и импульсу и его точное направление на мишень со сканированием при заявленных габаритах кажется маловероятным.

Нельзя не сравнить доложенные на РТСОГ52 проекты и идеи с проектами и идеями, ранее рожденными в России.

В первую очередь это относится к предложенным в Протвино В. Е. Балакиным компактным и недорогим синхротронам для ускорения протонов и ионов. Хотя эти синхротроны не обладают высокой интенсивностью, они будут вполне пригодны для облучений не очень больших мишеней. Однако в этих проектах нет современной системы направления пучка с оптимальных направлений к лежащему горизонтально пациенту. Это существенный, но преодолимый дефект.

В работах М. М. Каца были предложены «плоские системы», которые для выбора направления облучения лежащего горизонтально пациента используют только неподвижные магниты. Пучок поворачивается в вертикальной плоскости на определенный угол, а процедурный стол с неподвижно зафиксированным на нем лежащим пациентом смещается в вертикальном направлении так, чтобы пучок попадал в мишень. Плоские системы обладают максимальной компактностью, минимальной стоимостью, простотой, минимальным потреблением электроэнергии и могут применяться в разных вариантах, как для пучков протонов, так и для пучков ионов.

Однако плоские системы не позволяют анализировать пучок (требуют использования уже выделенного полезного пучка) и не позволяют выбирать в одной комнате любые направления облучения. По сравнению с современными решениями для центра с одной процедурной комнатой плоские системы имеют и преимущества, и недостатки. Для центров протонной терапии с несколькими процедурными комнатами и для центров ионной терапии конструктивной альтернативы плоским системам пока предложено не было.

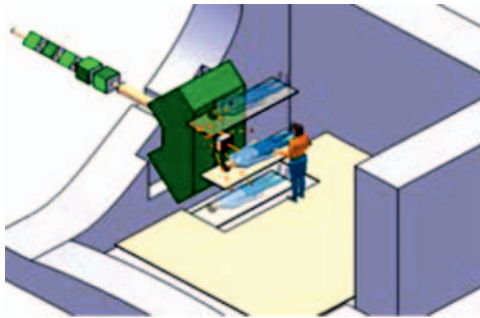


Рис. 7. Схема плоской системы

По сравнению с современными решениями для центра с одной процедурной комнатой плоские системы имеют и преимущества, и недостатки. Для центров протонной терапии с несколькими процедурными комнатами и для центров ионной терапии конструктивной альтернативы плоским системам пока предложено не было.

## ВЫВОДЫ

Конференция показала возрастание научного и практического интереса к применению протонных и ионных пучков в лечении онкологических заболеваний. Клинические результаты лечения являются обнадеживающими.

Материалы конференции PTCOG52 (абстракты) доступны по адресу [www.ptcog52.org](http://www.ptcog52.org). Адронной терапии посвящен номер «Acta Oncologica» (2013. V. 52, No. 3).