ПЛОСКАЯ СИСТЕМА ТРАНСПОРТИРОВКИ ПУЧКОВ ПРОТОНОВ И ИОНОВ К НЕПОДВИЖНОМУ ЦЕНТРУ ОБЛУЧЕНИЯ С РАЗНЫХ НАПРАВЛЕНИЙ

М.М. Кац,
Институт теоретической и экспериментальной физики, Москва

1Предложена новая компромиссная компактная простая и недорогая система транспортировки пучков протонов и ионов к неподвижному центру облучения пациента.

Ключевые слова: *протонная терапия, ионная терапия, гантри*

Введение

Эффективная протонная и ионная терапия опирается на использование громоздких сложных и дорогих гантри [1, 2]. Это оборудование существенно затрудняет широкое внедрение современного эффективного метода лечения. Поиски новых вариантов систем транспортировки пучков ведутся непрерывно во многих направлениях. Однако единого оптимального решения (особенно для транспортировки пучка ионов) пока нет [3]. Известны разные компромиссные решения транспортировки пучка к пациенту, но они либо сильно ограничены по возможностям [4, 5], либо не воспринимаются врачами из-за смещения центра облучения при изменении направления пучка [6–9]. Фирмы IBA [10] и MEVION [11] начали внедрять оригинальные компактные центры протонной терапии с одной процедурной комнатой. Эти установки не предполагают существенного уменьшения стоимости лечения и не могут транспортировать пучки ионов. Попытки разработать идеальную систему с высокой точностью распределения дозы в большом объеме за короткое время с любого направления при неподвижном центре облучения с дополнительной возможностью томографии пациента протонным пучком (при его увеличенной энергии) приводит к увеличению и без того неприемлемых параметров гантри (габариты, поворачиваемый вес, сложность, стоимость) [12–14].

Цель данной работы состояла в поиске компромиссного решения транспортировки пучков протонов и ионов “теплыми” неподвижными магнитами с небольшим весом к неподвижному изоцентру установки, в который помещен центр мишени, при возможностях использования достаточно широкого диапазона направлений облучения (до ±60°), сканирования мишеней с максимальными размерами 20×20 см при минимальном объеме процедурного каньона.

Плоская система с непрерывным диапазоном направлений

На первом этапе поиска были рассмотрены варианты магнитных каналов с непрерывным спектром возможных направлений. Рассмотрены системы из двух неподвижных “теплых” ($B \leq 1{,}6$ Тл) магнитов, поворачивающих исходный горизонтальный пучок в противоположных направлениях в вертикальной плоскости.

Пусть первый магнит поворачивает пучок на угол F_1, а второй магнит – на угол F_2. Тогда направление пучка на мишень будет $F=F_2-F_1$. Магниты расположены так, чтобы линейная дисперсия пучка на мишени была скомпенси-

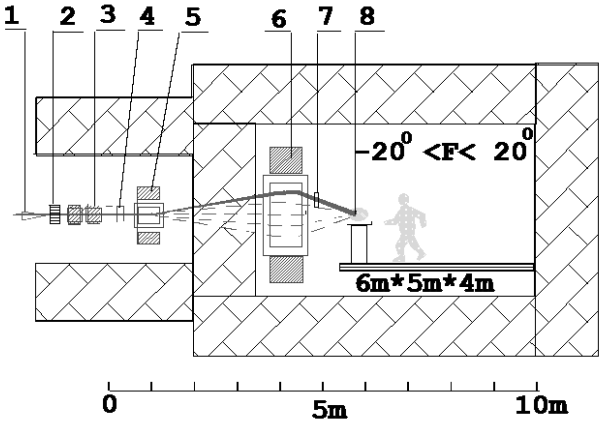

Рис. 1. *Пространственная схема плоской системы для транспортировки пучка протонов с неподвижным изоцентром установки и непрерывным диапазоном направлений относительно горизонтальной плоскости –20°<F<20°: 1– входной полезный пучок, 2 – пучковый затвор, 3 – квадрупольные линзы, 4 – сканирующие магниты, 5 – первый магнит, 6 – второй магнит с увеличенным зазором, 7 – приборы, 8 – центр облучения*

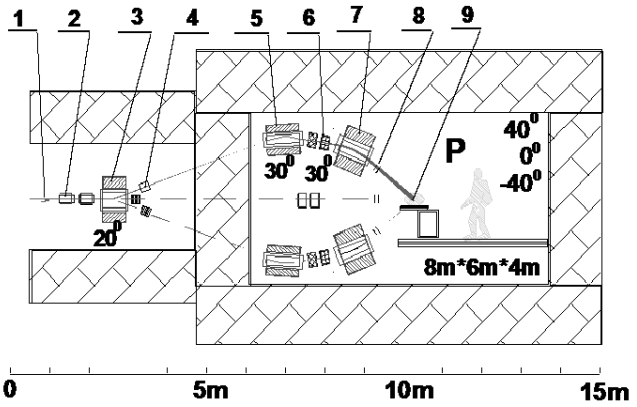

Рис. 2. *Расположение неподвижных "теплых" магнитов плоской системы для транспортировки пучка протонов к неподвижному изоцентру установки трех фиксированных направлений (–40°, 0, 40°): 1 – входной полезный пучок, 2 – квадрупольные линзы, 3 – первый магнит, 4 – пучковые затворы, 5 – поворотные магниты, 6 – сканирующие магниты, 7– последний магнит с увеличенным зазором, 8 – приборы, 9 – центр облучения*

рована. Фокусирующие линзы и сканирующие магниты расположены до первого магнита. При этом эффективное расстояние сканирования будет более 3 м. На рис. 1 для примера показана пространственная схема такого оборудования для пучка протонов и диапазона направлений относительно горизонтальной плоскости –20°<*F*<20°. Первый магнит с размером вдоль пучка 25 см и рабочим зазором 22×6 см имеет вес около 1 т и поворачивает пучок вверх или вниз на угол до 10°. Второй магнит с размером вдоль пучка 75 см и рабочим зазором 150×18 см имеет вес около 50 т и поворачивает пучок в противоположном направлении на угол до 30°. Расстояние от второго магнита до изоцентра установки около 150 см. Предполагается, что при использовании плоской системы облучение пациента о другой стороны тела проводится в следующей фракции.

Усложнение формы полюсов второго магнита с целью уменьшения его веса приводит к усложнению магнитной оптики системы при сканировании. При заметном увеличении диапазона направлений второй магнит в подобной системе будет избыточно громоздким и дорогим (для диапазона направлений ±30° вес второго магнита будет более 150 т). Диапазон направлений облучения –20°<*F*<20° кажется недостаточным как для больших мишеней (диаметром более 4 см), так и для неглубоких мишеней (при глубине менее 2 см). Подобную систему нельзя применить для транспортировки ионов из-за большого веса второго магнита. Поэтому такая система транспортировки не кажется перспективной.

Плоская система с дискретными направлениями пучка

На втором этапе поиска были рассмотрены варианты магнитных каналов с несколькими (3–5) симметричными фиксированными направлениями пучка. На рис. 2 показана пространственная схема системы транспортировки протонов с направлениями пучка (–40°, 0°, 40°). Фокусирующие пучок квадрупольные линзы расположены до первого магнита. Для каждого из повернутых направлений пучка для второго поворота пучка желательно использовать не один, а несколько (2–3) магнитов с небольшим весом. Сканирующие магниты расположены непосредственно перед последним из этих поворотных магнитов. При этом расстояние сканирования будет достаточно большим (около 3 м), а сечение рабочего зазора последнего магнита может быть уменьшено до 14×14 см, исходя из геометрии установки и максимальных по-

перечных размеров мишени. Таким способом можно существенно уменьшить вес и мощность последнего магнита. При этом расстояние сканирования будет около 2,5 м. Значительная доля всех облучаемых мишеней находится на глубине менее 20 см. Тогда для глубины мишени 15 см при трех направлениях облучения увеличение поверхностной дозы по сравнению со сканированием с расстояния более 10 м не превысит 4 %. Нам кажется что такое превышение будет допустимым для компромиссной системы. Углы входа–выхода пучка в последний поворотный магнит выбираются из требований сканирования. Дополнительная фокусировка пучка достигается за счет небольших углов входа–выхода пучка в магниты второго поворота. Регистрирующие пучок приборы расположены после последнего магнита. На горизонтальном направлении пучка расположены только дополнительные квадрупольные линзы, сканирующие магниты и приборы.

Для транспортировки протонов используется пять магнитов. Первый магнит с размером вдоль пучка 50 см и рабочим зазором 30×6 см имеет вес около 2,5 т и поворачивает пучок вверх или вниз на угол 20°. В каждом из повернутых направлений второй магнит с размером вдоль пучка 75 см, поперечным зазором 18×6 см и весом около 2,5 т поворачивает пучок в противоположном направлении на 30°. Третий магнит, через зазор которого проходит пучок при сканировании, имеет размер вдоль пучка 75 см, поперечный зазор 42×14 см и поворачивает пучок тоже на 30° при весе около 9 т. Суммарный вес неподвижных магнитов около 26 т. Размер процедурного каньона по высоте около 4 м (рис. 2).

В аналогичной системе для транспортировки пучка ионов используются семь магнитов. Первый магнит поворачивает пучок вверх или вниз на угол 15°. Его длина вдоль пучка 10° см, он имеет поперечный зазор 42×6 см и вес около 8 т. В каждом из повернутых направлений второй и третий магниты поворачивают пучок в противоположном направлении на углы по 20°. Их размеры вдоль пучка 140 см при поперечных зазорах 18×6 см и весе около 6 т. Четвертый магнит, через зазор которого проходит пучок при сканировании, имеет размер вдоль пучка 100 см, поперечный зазор 43×14 см и поворачивает пучок на 15° при весе около 15 т. Суммарный вес неподвижных магнитов около 62 т. Размер процедурного каньона по высоте около 6 м (рис. 3).

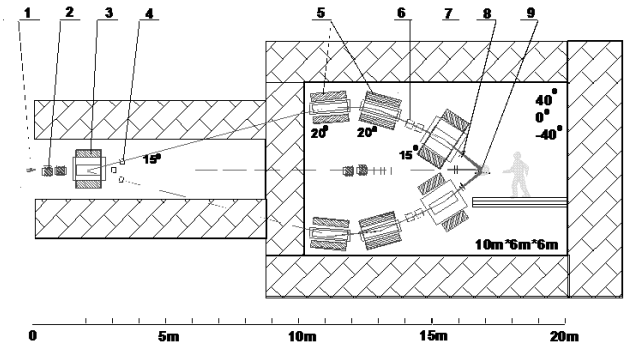

Рис. 3. *Схема расположения неподвижных "теплых" магнитов плоской системы для транспортировки пучка ионов к изоцентру установки с трех фиксированных направлений –40°, 0°, 40°: 1 – входной полезный пучок, 2 – квадрупольные линзы, 3 – первый магнит, 4 – пучковые затворы, 5 – поворотные магниты, 6 – сканирующие магниты, 7 – последний магнит с увеличенным зазором, 8 – приборы, 9 – центр облучения*

На рис. 4 и 5 показаны схемы огибающих пучка ионов при их транспортировке в направлении 0° и 40°, рассчитанные при помощи программы TRANSPORT во 2 порядке для исходно параллельного пучка с фазовым объемом 5 мм×мрадиан в обеих плоскостях. Видно, что сфокусированный в изоцентре установки пучок имеет диаметр около 6 мм и может быть использован для сканирования. Для сканирующих магнитов предусмотрено расстояние 1 м между магнитами М3 и М4.

Можно рассмотреть аналогичные системы с пятью направлениями пучка, (пример на рис. 6), но они кажутся менее целесообразными из-за большого количества магнитных элементов.

Применение поворотов процедурного стола и томографа

В последнее время обозначился значительный прогресс в использовании томографов непосредственно на месте облучения как для уточнения геометрии тела и опухоли, так и для оперативного уточнения плана облучения. Это позволило внедрять для изменения направления облучения повороты процедурного стола [15–17]. Такая технология может существенно расширить возможности описанных выше плоских систем.

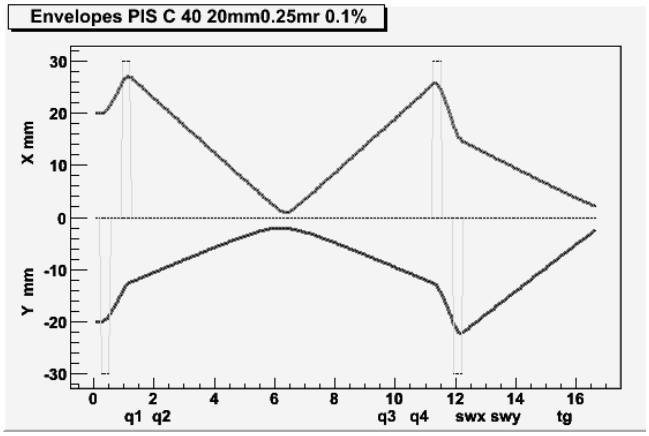

Рис. 4. *Огибающие пучка ионов при транспортировке в горизонтальном направлении*

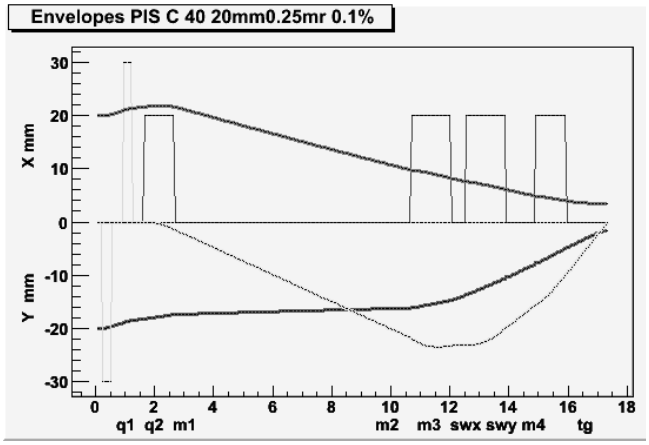

Рис. 5. *Огибающие и линейная дисперсия пучка ионов при транспортировке в направлении 40°*

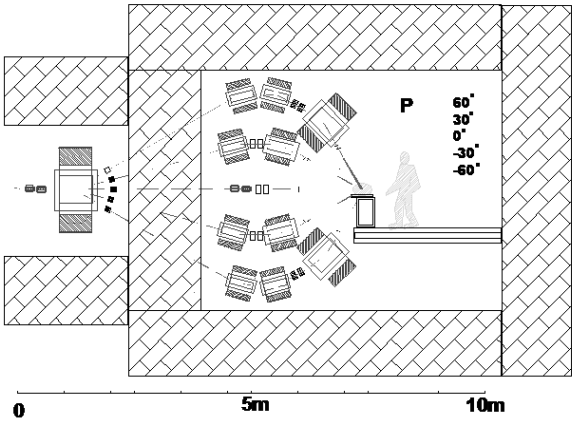

Рис. 6. *Плоская система с неподвижным центром облучения для пучка протонов с фиксированными направлениями облучения 60°, 30°, 0°, –30°, –60°*

Если процедурный стол с фиксированным пациентом может поворачиваться вспомогательным механизмом на небольшие углы в пределах $\pm f$ вокруг горизонтальной оси, которая проходит через центр мишени параллельно вертебральной оси пациента, не нарушая комфортное положение пациента, то при этом не только расширяется диапазон возможных направлений облучения, но этот диапазон становится непрерывным в пределах $\pm(F+f)$. Угол f не превышает 20° [17]. Если при одном фиксированном направлении пучка томограф надо применять после каждого поворота процедурного стола, то при возможности использовать любое положение процедурного стола с тремя независимыми направлениями пучка в каждой фракции можно проводить томографию однократно и на ее основе создавать уточненные планы облучения со всех трех направлений. Чтобы томограф не облучался пучком протонов или ионов, надо предусмотреть его смещение на время облучения на безопасное расстояние вбок от пучка. Возможная пространственная схема такого оборудования для пучка ионов показана на рис. 7.

Сравнение предложенной системы и существующих гантри

Из табл. 1 видно, что предложенная для транспортировки ионов система имеет существенные преимущества перед существующими и разрабатываемыми гантри не только по размеру процедурного каньона, но и по весу, мощности и отсутствию поворотов пучка. Все это приводит к существенному снижению стоимости оборудования. При транспортировке пучка протонов применение компактных гантри (например, PROTEUS ONE фирмы IBA) кажется целесообразнее применения плоских систем.

В какой степени система транспортировки пучка с диапазоном направлений ($-60° < F < 60°$) к изоцентру установки может заменить гантри? Этот сложный вопрос выходит за рамки компетенции автора и не сводится к анализу уже освоенных технологий облучения, но он обсуждался в двух докладах на конференции, посвященной применению сверхпроводящих магнитов в гантри.

В докладе [17] на примерах планов реализованных облучений в PSI утверждалось, что гантри с любыми направлениями облучения

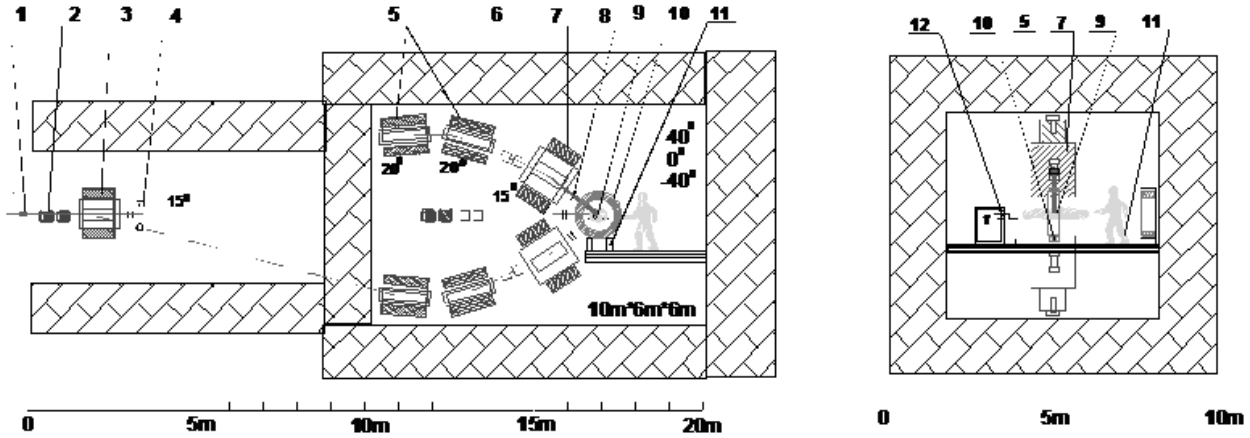

Рис. 7. *Расположение неподвижных "теплых" магнитов плоской системы для транспортировки пучка ионов к изоцентру установки с использованием дополнительных поворотов процедурного стола и томографа. Диапазон возможных направлений облучения (при f≤20°) –60°<F+f<60°: 1 – входной полезный пучок, 2 – квадрупольные линзы, 3 – первый магнит, 4 – пучковые затворы, 5 – поворотные магниты, 6 – сканирующие магниты, 7 – последний магнит с увеличенным зазором, 8 – приборы, 9 – центр облучения, 10 – томограф в рабочем положении, 11 – механизм смещения томографа, 12 – механизм поворотов процедурного стола*

Таблица 1

Сравнение параметров гантри HIT, HIMAC и предложенной системы для ионов

	HIT	HIMAC	Плоская с томографом
Диапазон направлений	0–360^0	0–360^0	±60^0
Максимальное поле, Тл	1,8	2,9	1,6
Размеры каньона, м	25×14×14	17×13×13	20×6×6
Вес оборудования, т	670 с поворотами	300 с поворотами	62 неподвижно
Мощность питания, МВт	0,8	0,3	0,1

более удобно врачам и поэтому необходимо. Однако в половине показанных планов направления облучения укладывались в диапазон направлений (–45°<*F*<45°), а в тех случаях, когда использовалось вертикальное направление пучка, еще два направления были под углами около 45°. При сканировании любая по форме и положению мишень может быть облучена равномерно с любого направления. Поэтому нам кажется, что качество лечения при отсутствии направлений пучка из верхнего конуса с углом 30° для значительной части пациентов будет не хуже, чем в случаях применения гантри, а для другой части пациентов качество лечения пострадает незначительно.

В докладе [18], основанном на опыте работы NPTC (Boston) утверждалось, что при использовании сканирования и при диапазоне направлений облучения (–20°<*F*<20°) качество облучения будет не хуже, чем при использовании гантри с пассивным распределением дозы. Очевидно, что более широкий диапазон направлений позволяет лучше обходить важные и чувствительные к облучению здоровые части тела и что эти возможности можно реализовать в предлагаемых системах.

Заключение

Предложенные компактные и простые компромиссные плоские системы позволят транспортировать пучки и протонов, и ионов "теплыми" неподвижными магнитами к неподвижному центру облучения с трех существенно разных фиксированных направлений. Направление пучка может дополнительно изменяться небольшими поворотами процедурного стола вокруг горизонтальной оси при использовании дополнительной томографии. Пучок с обычными размерами фазовых объемов можно

хорошо сфокусировать на мишень при соблюдении условий для сканирования. Все магниты не тяжелые и простые по конструкции. Все оборудование может располагаться в компактных помещениях (высота 4–6 м, ширина зависит от удобств работы врачей). Нам кажется, что такое оборудование позволит существенно снизить стоимость лечения пучками протонов и ионов. При диапазоне доступных направлений около ($-60° < F + f < 60°$) и при уточнении плана облучения в каждой фракции дополнительной томографией, не менее 60 % всех пациентов можно будет облучать при помощи предложенных систем при сравнимом качестве с облучением на гантри, при этом все пациенты могут быть облучены значительно лучше, чем при использовании пучков с двумя фиксированными направлениями.

Благодарности

Автор выражает глубокую благодарность Jay Flanz (MGH) за идею рассмотреть возможности плоских систем с неподвижным центром облучения, а также физикам Alexander Gerbershagen (PSI) и Ирине Канчели (ИТЭФ) за полезные обсуждения.

Список литературы

1. Jongen Y. Gantries and beam spreading systems. The RITA network and the design of compact proton accelerators // TERA Collaboration. 1996. P. 305–336.
2. Amaldy U., Kraft G. European developments in radiotherapy with beams of large radiobiological effectiveness // J. Radiat. Res. Suppl. 2007. Vol. 48. A27–A41.
3. https://indico.psi.ch/contributionListDisplay.py?confId=3575 Gantry Workshop II. September 17. 2015.
4. Kamada T. Status of heavy ion therapy at NIRS // PTCOG-53, scientific session. Shanghai. 2014.
5. Fabich A. edAustron – The Austrian Ion Therapy and Research Centre 1.06.2012.
6. Safai S., Lomax T. Proton Therapy at PSI. Workshop II September 17, 2015.
7. Pullia M. CNAO gantry. Workshop II September 17, 2015.
8. Kats M. New schemes of multidirectional patient irradiation systems for cancer treatment with heavy charged particles beams. – TERA Report 2002/3. FAS11, 02.2002.
9. Kats M. Compact and not expensive compromise transport system for proton and ion beams. – Gantry Workshop II September 17. 2015.
10. Pearson E. How to keep high quality treatments using a compact gantry (PROTEUS ONE IBA) – ibid.
11. MEVION.com.
12. Koschik A. Duppich J. (PSI) Project Gantry 3 – ibid.
13. Owen H. Gantries and Beam Delivery for 350 MeV p+ – ibid.
14. Gerbershagen A. Advantages and challenges of superconducting magnets in gantry designs. – ibid.
15. Balakin V. Status of development of installation for proton conformal therapy application. – PTCOG36. 2002. Catania.
16. Iversen G. Proton therapy minus the ganry: P-Cure at ASTRO. // ASTRO57. October 21, 2015. DOTmed HCB News. P-cure.
17. Lomax T. (PSI) Clinical importance of gantries in particle therapy – Gantry Workshop II September 17, 2015.
18. Flanz J. (MGH) Gantry Optics & Some 'Challenges' – ibid.

PLANAR PROTON AND ION BEAM TRANSPORT SYSTEM ONTO NON MOVING IRRADIATION CENTRE FROM DIFFERENT DIRECTIONS

M. Katz

Institute of Theoretical and Experimental Physics, Moscow, Russia

A new compromised compact simple and not expensive transport system for medical facilities using proton and ion beams is proposed.

Key words: *proton beam therapy, ion therapy, simple planar system*

E-mail: markmkats@gmail.com