

ПРИМЕНЕНИЕ УСКОРИТЕЛЕЙ

УДК 539.1.076

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРАПЕВТИЧЕСКОГО ПРОТОННОГО ПУЧКА ИЯИ РАН

*С.В. Акулиничев, В.Н. Асеев, В.Н. Васильев, Ю.К. Гаврилов, Р.Д. Илич¹,
А.А. Коконцев, Д.Б. Лазебник, В.М. Скоркин*

Институт ядерных исследований РАН, Москва, Россия;

¹Институт ядерных наук ВИНЧА, Белград, Сербия и Македония

В Комплексе протонной терапии (КПТ) Института ядерных исследований РАН в качестве источника протонов используется линейный ускоритель, позволяющий получать на выходе пучки протонов с энергиями от 70 до 209 МэВ. В настоящее время введен в эксплуатацию канал транспортировки с предварительным формированием протонного пучка [1]. Следующим этапом является создание системы индивидуального формирования пучка, обеспечивающей однородность профиля и равномерное распределение поглощенной дозы в мишени. Для этого необходимо оценить распределение интенсивности в сечении пучка, его энергетические и угловые характеристики. В настоящей работе представлены результаты экспериментальных и теоретических исследований этих характеристик.

1. ОБОРУДОВАНИЕ И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Схема размещения основного оборудования представлена на Рис.1. После прохождения системы транспортировки длиной около 200 м, включающей несколько поворотных магнитов, пучок выходит из вакуумного ионопровода через алюминиевую мембрану толщиной 1 мм, находящуюся на расстоянии 13,362 м от изоцентра (точки пересечения оси пучка и оси вращения позиционера пациента).

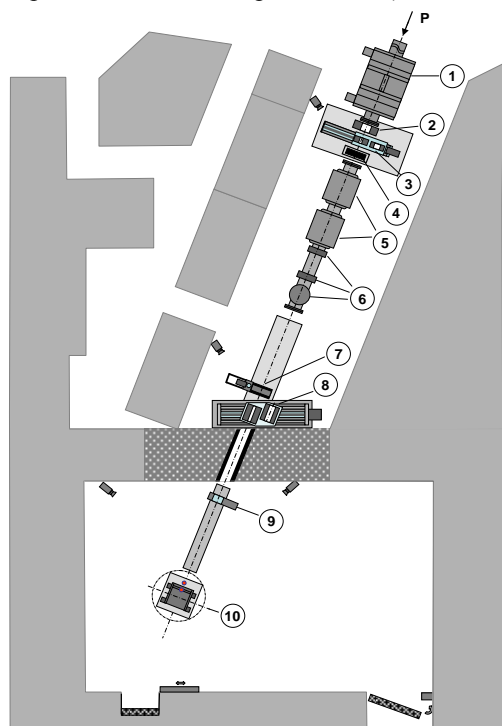


Рис.1. Медицинский канал КПТ ИЯИ РАН.

- 1 - квадрупольные линзы; 2 - коллиматор 100 мм;
- 3 - коллиматоры I-40, 70 мм; 4 - аварийный затвор;
- 5 - дипольные магниты; 6 - профилометры пучка;
- 7 - рабочий затвор; 8 - коллиматоры II-40, 70 мм;
- 9 - ионизационная камера; 10 - водный фантом

За мембраной следует воздушный промежуток шириной 50 см, а далее – дополнительный вакуумированный участок ионопровода длиной 712 см, имеющий с двух сторон окна из каптона толщиной 0,15 мм. Далее пучок проходит в воздухе расстояние 627,5 см до изоцентра лучевой установки, включая канал в биологической защите толщиной 120 см.

В разрезе ионопровода и перед защитой установлены ограничивающие пучок коллиматоры внутренним диаметром 100 мм. Дополнительные коллиматоры диаметром 40 и 70 мм, управляемые дистанционно, могут быть введены в пучок для уменьшения его диаметра в процессе облучения или измерений. При прохождении последнего участка ионопровода пучок поднимается на 25 см с помощью двух корректирующих магнитов. Энергия протонов в конце основного ионопровода во время последнего сеанса (апрель 2008 года) была равна 158,6 МэВ (часть энергии затем терялась в окнах ионопроводов и воздухе), частота импульсов – 50 Гц, длина импульса – 20...30 мкс. Геометрическая ось пучка определялась с помощью лазерного нивелира по геодезическим меткам.

Измерения поглощенной дозы в воде были выполнены с помощью анализатора поля Wellhofer WP600, включающего водный фантом размером 600×600×300 мм, систему трехмерного перемещения ионизационной камеры в нем и управления этим перемещением, две ионизационные камеры типа IC-10 объемом 0,14 см³ – референсную и полевую (рабочую), двухканальный электрометр для измерения ионизационного тока камер и управляющий компьютер. Полевая камера устанавливалась в позиционере (устройстве перемещения) для сканирования мощности дозы в различных точках внутри водного фантома, а референсная фиксировалась на боковой стенке фантома в пределах пучка протонов, но так, чтобы не затенять полевую камеру во время сканирования. Регистрировалось отношение сигналов полевой и референсной камер, компенсируя, таким образом, существенную нестабильность интенсив-

ности падающего пучка. Пучок протонов проходил через боковую акриловую стенку фантома толщиной 10 мм, что эквивалентно 11,6 мм воды. Ось ионизационной камеры была направлена параллельно оси пучка, сканирование глубинных доз и профилей проводилось относительно изоцентра. При установке камеры в изоцентр расстояние от нее до внутренней поверхности фантома составляло 10 мм, а эффективная точка камеры находилась, по данным фирмы-изготовителя, на расстоянии 4,1 мм от ее конца. Таким образом, в изоцентре эффективная глубина положения детектора составляла 25,7 мм воды. Позиционирование детектора в фантоме проводилось с точностью 0,1 мм, скорость перемещения при сканировании составляла 7 мм/с. Распределение поглощенной дозы по глубине водного фантома было дополнительно исследовано с помощью алмазного детектора ДКДа-01-ИФТП. Детектор был закреплен в позиционере WP600 с помощью специально изготовленного адаптера. При установке в изоцентр эффективная глубина воды до его эффективной точки была равна 35,1 мм с учетом толщины стенки фантома. На передней стенке закреплялась ионизационная камера IC-10, играющая роль монитора пучка. С помощью позиционера алмазный детектор устанавливался в заданном положении на оси протонного пучка, затем одновременно в течение 30 с проводилось измерение поглощенной дозы как алмазным детектором, так и ионизационной камерой, и регистрировалось отношение первого значения ко второму.

2. МЕТОДИКА РАСЧЕТОВ

Ряд характеристик пучка был получен расчетным путем. Для этого использовалась программа моделирования переноса протонов методом Монте-Карло SRNA, разработанная в Институте ядерных наук ВИНЧА (Белград, Сербия), а также программа TRIM (являющаяся частью более общего пакета SRIM 2008).

Программа SRNA разработана для моделирования переноса протонов с энергиями от 100 кэВ до 250 МэВ в дозиметрии и радиотерапии. Моделирование происходит в трехмерной геометрии, причем зоны объекта с разным элементным составом ограничиваются поверхностями второго порядка и плоскостями. Тормозные способности различных материалов рассчитываются на основе данных доклада МКРЕ 49 [11], флуктуации потерь энергии разыгрываются на основе распределения Вавилова с поправкой Шулека на влияние электронной оболочки. Углы рассеяния протонов разыгрываются из распределения Мольера или Гоудсмита-Саундесона с поправкой Бергера. Для моделирования неупругих ядерных взаимодействий использовалась модель MSDM из программы SHIELD [3, 4]. При этом считалось, что сложное ядро распадается с испусканием нейтронов, протонов, дейтронов, тритонов, альфа-частиц и фотонов. Их энергия и углы вылета разыгрываются из соответствующих распределений, тяжелые частицы считаются поглощенными локально, а параметры остальных запоминаются для последующего моделирования их переноса в среде. Алго-

ритм работы программы SRNA изложен в работах [6-8], а ее экспериментальная верификация проведена в работах [2, 9, 10].

Программа TRIM позволяет рассчитывать потоки протонов при прохождении плоскопараллельной слоистой структуры, регистрируя энергию, направляющие косинусы и координаты точки выхода протона из последнего слоя. После соответствующей обработки массива результатов могут быть получены интегральные и дифференциальные характеристики потока протонов на выходе. При моделировании переноса протонов рассматриваются только электромагнитные процессы, неупругие ядерные реакции не учитываются. Более детально методика моделирования и возможности программы TRIM описаны в работе [13] и на сайте разработчиков <http://www.srim.org>.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

3.1. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ГЛУБИННЫХ ДОЗ ПРОТОННОГО ПУЧКА

Глубинные дозы для каждой пары коллиматоров диаметром 40, 70 и 100 мм были измерены трижды вдоль геометрической оси протонного пучка. Среднеквадратичное отклонение в серии составляло 1...3% для диаметра коллиматора 40 мм, 1...1,5% для коллиматора 70 мм и 1...2% для коллиматора 100 мм. Усредненные кривые, полученные для каждого из коллиматоров, также были близки между собой, типичное расхождение между ними составляло 1...2%, увеличиваясь вблизи поверхности фантома до 2...3%, и находилось, таким образом, в пределах статистической погрешности измерений.

Систематическая погрешность результатов измерений была обусловлена изменением эффективности сбора заряда в полости ионизационной камеры и изменением чувствительности камеры в зависимости от глубины и энергии протонов. Потери на рекомбинацию заряда в ионизационной камере IC-10 для указанных выше параметров пучка были рассчитаны на основе модели Боуга [12] и составили около 1,5% при средней мощности дозы в пике Брэгга 4 Гр/мин. Эта величина рассматривалась как оценка предельного изменения отклика камеры, обусловленного этим эффектом, при ее перемещении в фантоме. Поправочный коэффициент k_{Q,Q_0} , определяющий чувствительность камеры в зависимости от остаточного пробега протонов, табулирован в докладе МАГАТЭ TRS 398 [1]. В интервале остаточных пробегов от 0,5 до 20 см он изменяется от 1,041 до 1,037, причем на большей части этого интервала изменение не превышает 0,2%. Эта величина мала по сравнению с другими рассмотренными выше компонентами погрешности.

Отношение дозы в изоцентре на глубине 25,7 мм воды к дозе в пике Брэгга составляло 0,289, а соответствующее экстраполированное значение на поверхности фантома – 0,274, что несколько выше значений, полученных для моноэнергетических пучков соответствующих энергий.

Измерения алмазным детектором проводились в дискретном наборе точек по 3-8 раз на точку, затем

рассчитывалось среднее значение отношения доз детектора и референсной ионизационной камеры и среднеквадратичное отклонение. В области пика Брэгга измерение кривой глубинной дозы проводилось с шагом 1 мм, при этом погрешность позиционирования детектора составляла 0,1 мм.

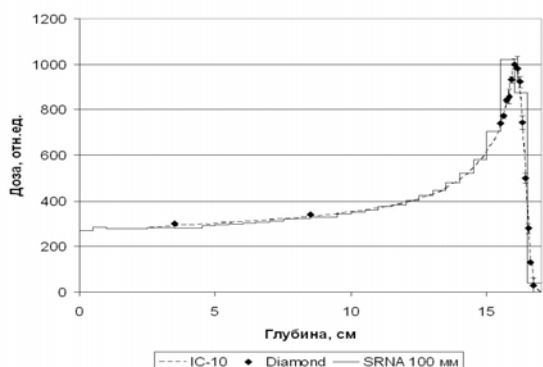


Рис.2. Глубинные распределения дозы для коллиматоров 100 мм, измеренные ионизационной камерой IC-10, алмазным детектором и рассчитанные по программе SRNA

Результаты измерений показаны на Рис.2 наложенными на кривую Брэгга, полученную с помощью ионизационной камеры IC-10. Среднеквадратичное отклонение составляло в разных точках от 0,4 до 7,8% (приведено на графике), в среднем – 2,8%. Результаты показывают, что во всех точках значения дозы, измеренные ионизационной камерой и алмазным детектором, близки между собой, положение и форма пика Брэгга в этих двух наборах данных также хорошо согласуются. Изменение чувствительности алмазного детектора в зависимости от энергии протонов было оценено по отношению их тормозных способностей в углероде и воде и не превышало 0,1% во всем рабочем диапазоне энергий.

Распределение поглощенной дозы на оси пучка было исследовано также с помощью программы SRNA путем моделирования переноса протонов методом Монте-Карло через систему транспортировки пучка, а затем в водном фантоме. Для этого водный фантом был разделен на элементы объема – воксели – размером 5×5×5 мм, в которых рассчитывалось энерговыделение как первичных протонов, так и вторичных частиц, образовавшихся в результате неупругих ядерных реакций.

Общее число падающих протонов было равно 10^7 на один вариант расчета, при этом среднеквадратичное отклонение составляло от 0,5% в пике Брэгга до 1% в области плато. Результаты моделирования представлены на Рис.2, нормировка к экспериментальным данным осуществлялась по значению дозы в изоцентре на глубине 26,7 мм. Расчетные и экспериментальные данные находятся в хорошем согласии с учетом усреднения расчетных значений дозы по вокселу сравнительно большого размера – 5 мм.

3.2. РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ДОЗЫ

Распределения поглощенной дозы на уровне пика Брэгга были измерены с помощью ионизационной камеры IC-10 и рассчитаны методом Монте-

Карло с помощью программы SRNA. Моделирование переноса протонов проведено в водном фантоме при размере вокселя 5 мм. нормировка к измеренным значениям выполнена по значению дозы на оси пучка. Горизонтальные распределения представлены на Рис.3, вертикальные (только для коллиматоров 70 и 100 мм) – на Рис.4.

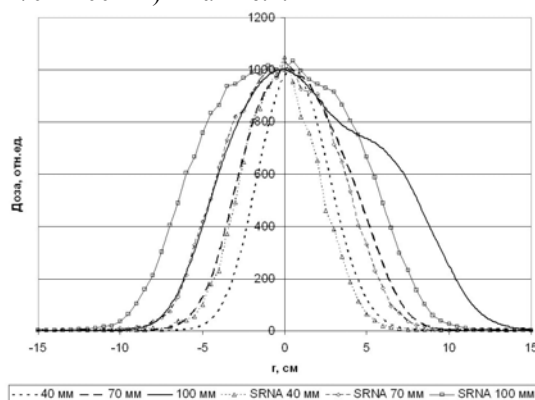


Рис.3. Горизонтальные экспериментальные и расчетные распределения дозы на уровне пика Брэгга

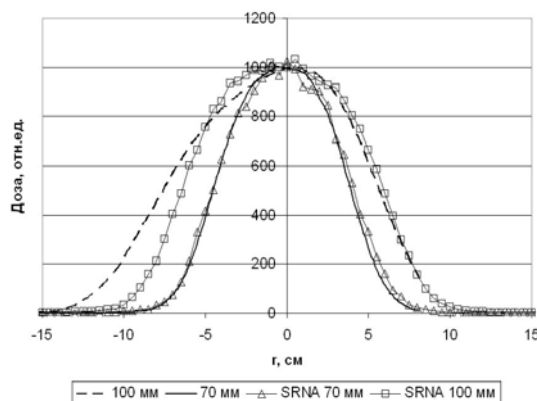


Рис.4. Вертикальные распределения дозы, измеренные камерой IC-10 и рассчитанные методом Монте-Карло по программе SRNA

Расчетная и измеренная ширина профилей на половине высоты слабо зависит от глубины (пучок почти параллельный) и представлена в таблице.

Ширина распределений поглощенной дозы на половине высоты в воде, мм

| Тип профиля | Диаметр коллиматора, мм | Измерение | Расчет SRNA |
|----------------|-------------------------|-----------|-------------|
| Горизонтальный | 40 | 48 | 54 |
| | 70 | 79 | 87 |
| | 100 | 127 | 125 |
| Вертикальный | 70 | 84 | 87 |
| | 100 | 132 | 125 |

Расчетные и экспериментальные значения ширины пучка на полувысоте находятся в хорошем согласии друг с другом. Однако для коллиматора 70 мм и, в еще большей степени – для 100 мм, наблюдается существенная асимметрия пучка, обусловленная рассеянием на конструктивных элементах системы его транспортировки, не учитываемых при моделировании, либо влиянием систем магнитной фокусировки.

Центр распределения при диаметре коллиматора 40 мм смещен вправо (вид со стороны протонного пучка) на 5...6 мм. Значимого изменения величины этого смещения с глубиной обнаружено не было. Для коллиматора диаметром 70 мм было оценено влияние дальнего (первого по ходу пучка и установленного в разрезе ионопровода) коллиматора. Оказалось, что профили с введенным и выведенным дальним коллиматором практически идентичны, это косвенно свидетельствует, что диаметр пучка в воздушном промежутке между ионопроводами меньше 70 мм.

Вертикальные распределения были измерены для коллиматоров 70 и 100 мм (см. Рис.4). В связи с конструкцией и особенностями нестандартного применения фантома WP600 ход детектора в вертикальном направлении был ограничен уровнем воды в фантоме и составлял 28 см.

Распределение дозы для коллиматора 70 мм было близко к симметричному, его максимум интенсивности был смещен на 9,7 мм выше геометрической оси пучка. Форма профиля находится в хорошем согласии с результатами моделирования методом Монте-Карло с помощью программы SRNA. Для коллиматора 100 мм вертикальный профиль асимметричен в верхнем направлении (приблизительно на 26 мм), а максимум расположен на 4,7 мм выше геометрической оси протонного пучка. Совпадение с данными SRNA достигается лишь для одной половины профиля, не содержащей асимметричных искажений.

3.3. ОЦЕНКА ПРОБЕГА И ЭНЕРГИИ ПРОТОНОВ

Анализ точного положения пика Брэгга и его спада представлен на Рис.5 для трех диаметров коллиматора. При диаметре 40 мм глубина максимума пика Брэгга была равна 160,7 мм от поверхности воды (с внесенной поправкой на толщину стенки фантома), а 80% уровень спада пика Брэгга, соответствующий пробегу протонов в приближении непрерывного замедления (CSDA Range), составил 163,1 мм от поверхности. Разброс между кривыми соответствует погрешности позиционирования, т.е. ~ 0,1...0,2 мм.

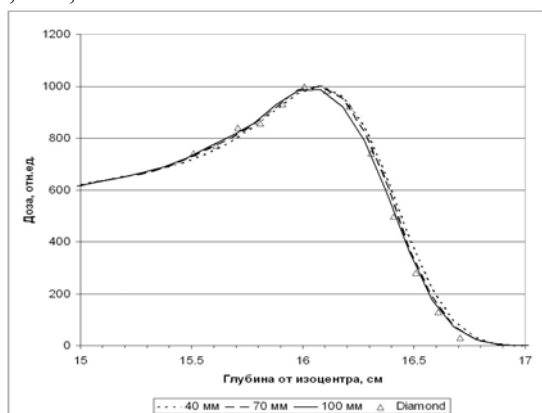


Рис.5. Анализ положения пика Брэгга в воде

Для коллиматора диаметром 70 мм максимум пика Брэгга находился на глубине 160,5 мм от поверхности, уровень 80% пика Брэгга – на глубине 163,1 мм от поверхности. Разброс между рядами данных несколько больше и составляет ~0,3 мм.

Наконец, для коллиматора 100 мм смещение пика Брэгга составляло 160,2 мм от поверхности воды, а величина пробега протонов – 162,7 мм от поверхности воды. Разброс между рядами данных для этого коллиматора оказался существенно больше, чем в предыдущих случаях, и составил около 1 мм.

Потенциально некоторую систематическую погрешность в положение пика Брэгга может давать неопределенность положения эффективной точки камеры. В соответствии с документацией фирмы-изготовителя она сдвинута по оси камеры на 4,1 мм от ее конца. Однако определение эффективной точки проводилось изготовителем для конвенционального излучения – фотонов и электронов. Для протонных пучков эта точка потенциально может быть несколько смещена. Для полного анализа этого вопроса необходимо моделирование отклика камеры методом Монте-Карло.

В предположении, что эффективная точка камеры IC-10 находится в указанном изготовителем положении для всех типов частиц, пробег протонов составляет 163 мм. Если основываться на соотношениях пробег-энергия из доклада МКРЕ 49 [11], это соответствует энергии падающих протонов 153,0 МэВ. Погрешность пробега ±0,5 мм соответствует погрешности оценки энергии ±0,3 МэВ (без учета неопределенности положения эффективной точки камеры). Результаты, полученные с помощью алмазного детектора (см. Рис.5), имеющего существенно лучшее пространственное разрешение по глубине, полностью согласуются с результатами камеры IC-10 – отклонение в оценке пробега не более 0,3 мм. Это подтверждает корректность оценки положения эффективной точки камеры, а также оценку погрешности средней энергии пучка ±0,3 МэВ.

3.4. РАСЧЕТНЫЕ ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ ПУЧКА ПРОТОНОВ

Распределение энергии протонов при входе пучка в водный фантом было получено также на основе моделирования переноса пучка методом Монте-Карло с помощью двух программ – SRNA и TRIM.

После прохождения окон ионопроводов и воздуха средняя энергия пучка составила 153,32 МэВ по результатам моделирования программы SRNA и 153,3 МэВ по результатам программы TRIM. Эти значения находятся в хорошем согласии с оценкой средней энергии протонов, сделанной на основе измерений глубинной дозы в воде и приведенной выше. Среднеквадратичное отклонение энергии протонного пучка σ_E по результатам моделирования с помощью программы SRNA было равно 0,61 МэВ, по результатам программы TRIM – 0,35 МэВ.

Энергетические спектры протонов, рассчитанные с помощью программ SRNA и TRIM, представлены на Рис.6. Результаты, рассчитанные для диаметров коллиматоров 40, 70 и 100 мм практически идентичны (в пределах статистической погрешности моделирования), поэтому на рисунке приведены данные только для коллиматора диаметром 100 мм. Формы спектров, рассчитанных обеими программами, близки друг к другу.

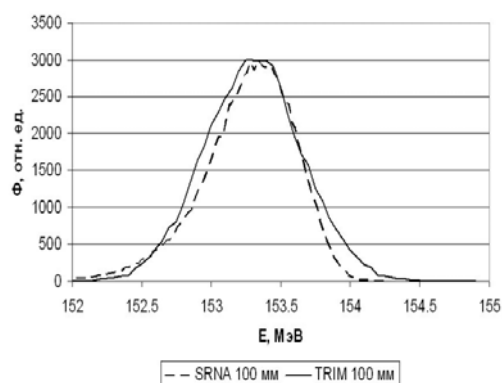


Рис.6. Энергетический спектр протонов при падении пучка на водный фантом

Угловое распределение протонов в области изоцентра близко к нормальному. Наиболее вероятный угол отклонения от оси равен 0,25 град, средний – 0,42 град. При таких углах увеличение полуширины пучка за счет его геометрического расхождения составляет около 1 мм, что качественно согласуется с результатами измерений профилей, но находится ниже погрешностей, связанных с пространственным разрешением камеры и уширением пучка за счет многократного рассеяния.

Наконец, на Рис.7 представлена проекция фазового пространства протонов в вертикальном направлении (в горизонтальном направлении результаты близки с точностью до статистики в связи с осевой симметрией задачи). В основном угловое распределение протонов находится в пределах угла ± 15 мрад, а пространственное распределение в изоцентре – в пределах ± 100 мм.

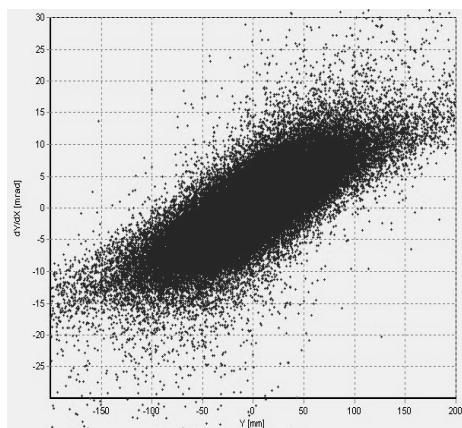


Рис.7. Вертикальная проекция фазового пространства протонов в изоцентре

ВЫВОДЫ

1. Измерены распределения глубинной дозы протонного пучка ИЯИ в водном фантоме с помощью ионизационной камеры IC-10 и алмазного детектора. Положение и форма пика Брэгга, полученные разными детекторами, согласуются между собой в пределах 0,5 мм.

2. Пробег протонов, оцененный по 80% уровню на спаде пика Брэгга, составил $163 \pm 0,5$ мм, а средняя энергия пучка, оцененная из результатов измерений, была равна $153,0 \pm 0,3$ МэВ.

3. Проведено моделирование переноса протонного пучка до процедурного помещения методом

Монте-Карло с помощью программ SRNA и TRIM, определены энергетические характеристики протонов в изоцентре. Средняя энергия пучка, рассчитанная обеими программами, была равна 153,3 МэВ, что хорошо согласуется с экспериментальной оценкой.

4. Горизонтальные и вертикальные распределения дозы слабо зависели от глубины в водном фантоме. Наблюдалась некоторая асимметрия профилей, полученных с коллиматорами 70 и 100 мм, вероятно, связанная с факторами, не учитываемыми теоретической моделью. Максимум профиля смещен относительно геометрической оси протонного пучка на 5...10 мм, что требует более тщательной центровки пучка с помощью отклоняющих магнитов.

5. Ширина распределений дозы (а для вертикальных профилей – и форма), рассчитанная с помощью программы SRNA, находится в хорошем согласии с результатами измерений.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Absorbed dose determination in external beam radiotherapy: An international code of practice for dosimetry based on standards of absorbed dose to water.* Vienna: IAEA TRS 398, 2000.
2. J.J. Beebe-Wang, F.A. Dilmanion, S.G. Peggs, D.J. Schlyer, et al. Feasibility of positron emission tomography of dose distribution in proton-beam cancer therapy // *Proc. of EPAC.* Paris, 2002, p.2721-2724.
3. A.S. Botvina, et al. MSDM - Multy Stage Dynamical Model // *International Codes and Model Intercomparison for Intermediate Energy Activation Yields.* Paris, France, 1997, p.307-312.
4. A.V. Dementyev, N.M. Sobolevsky. SHIELD, a Monte-Carlo hadron transport code // *Proc. of a Specialists' Meeting "Intermediate Energy Nuclear Data: Models and Codes".* Issy-les-Moulineaux, France, 1994, p.237-258.
5. M.I. Grachev, E.V. Ponomareva, L.V. Kravchuk, V.M. Scorkin, et al. System of preliminary formation of the beam for the channel of proton therapy // *XXI Russian Accelerator Conference.* Zvenigorod, 2008, p.352-354.
6. R.D. Ilic, D. Lalic, L.J. Stankovic. SRNA Monte-Carlo codes for proton transport simulation in combined and voxelized geometries // *Nuclear Technology & Radiation Protection.* 2002, v.XVII, №1-2, p.27-36.
7. R.D. Ilic, V. Spasic-Jokic, P. Belicev, M. Dragovic. The Monte-Carlo SRNA code as the engine in ISTAR proton dose planning software for TESLA accelerator installation // *Nuclear Technology & Radiation Protection.* 2004, v.XIX, №2, p.30-35.
8. R.D. Ilic, V. Spasic-Jokic, P. Belicev, M. Dragovic. The Monte-Carlo SRNA-VOX code for 3D proton dose distribution in voxelized geometry using CT data // *Phys. Med. Biol.* 2005, v.50, p.1011-1017.
9. R.D. Ilic, M.P. Pesic, R. Pavlovic, D. Mostracci. Distribution of proron absorbed dose in human eye simulated by SRNA-2KG computer code, QUADOS – Quality Assurance of Computational Tools for Dosimetry // *Intercomparison of usage of computa-*

- tional codes in radiation dosimetry, Bologna – Italy International Workshop Proceedings. July 14-16, 2003, p.163-166.*
10. E.A. Mascia, N. Schreuder, V. Anferov. *Characterizing on proton therapy beam using multi-layer Faraday cup.* Indiana University Cyclotron Facility, Internal Report, August 2001.
 11. *Stopping powers and ranges for protons and alpha particles:* ICRU Report 49. ICRU, Bethesda, 1993.
 12. *The dosimetry of pulsed radiation:* ICRU Report 34. ICRU, Bethesda, 1982.
 13. J.F. Ziegler, J.P. Biersack, M.D. Ziegler. *SRIM: The Stopping and Range of Ions in Matter,* 2008.

Стаття поступила в редакцію 07.09.2009 з.

THE STUDY OF THE THERAPEUTIC PROTON BEAM OF INR RAS

S.V. Akulinichev, V.N. Aseev, V.N. Vasiliev, Yu.K. Gavrilov, R.D. Ilic, A.A. Kokonцев, D.B. Lazebnik, V.M. Skorkin

At the Complex of proton therapy (CPT) of the Institute for nuclear researches of RAS a source of protons is the linear proton accelerator, providing protons with energies from 70 up to 209 MeV. The proton transportation channel with preliminary formation system of medical beams was tested. A system of individual beam formation, providing uniformity of a profile and uniform distribution of the absorbed dose in tumors, will be developed next. For this system design it is necessary to estimate intensity distributions, its energy and angular characteristics. Results of experimental and theoretical researches of these characteristics are presented in the present work.

ДОСЛІДЖЕННЯ МЕДИЧНОГО ПРОТОННОГО ПУЧКА ІЯД РАН

С.В. Акулінічев, В.Н. Асєєв, В.Н. Васильєв, Ю.К. Гаврилов, Р.Д. Іліч, А.А. Коконцев, Д.Б. Лазєбник, В.М. Скоркін

В Комплексі протонної терапії (КПТ) Інституту ядерних досліджень РАН як джерело протонів використовується лінійний прискорювач, що дозволяє одержувати на виході пучки протонів з енергіями від 70 до 209 МеВ. В даний час введено в експлуатацію канал транспортування з попереднім формуванням протонного пучка [1]. Наступним етапом є створення системи індивідуального формування пучка, що забезпечує однорідність профілю і рівномірний розподіл поглиненої дози в мішені. Для цього необхідно оцінити розподіл інтенсивності в перетині пучка, його енергетичні і кутові характеристики. У даній роботі представлено результати експериментальних і теоретичних досліджень цих характеристик.