

УСТАНОВКА ДЛЯ ВЕРИФИКАЦИИ БОЛЮСОВ В ПРОТОННОЙ РАДИОТЕРАПИИ

К. Н. Шипулин¹, Г. В. Мицын, А. В. Агапов

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Для придания конформности дозного распределения протонного пучка по глубине форме мишени рассчитываются и затем изготавливаются болусы — замедлители сложной формы, учитывающие гетерогенную структуру тканей и органов пациента, расположенных на пути пучка. Точность изготовления болусов, применяемых для лечения пациентов, является важным этапом в обеспечении гарантии качества прецизионной протонной лучевой терапии. В настоящей работе представлен разработанный программно-аппаратный комплекс для проведения верификации качества и точности изготовления болусов в Медико-техническом комплексе. Данное устройство состоит из системы позиционирования и закрепленных на ней двух оптических датчиков. В ходе эксперимента были проверены 20 болусов пяти пациентов. Общее количество измеренных точек составило 2562. Из всех измеренных точек только две имели значение, отличное от расчетного более чем на 0,5 мм. Для всех остальных точек отклонение от расчетного значения находилось в пределах $\pm 0,5$ мм. Созданное устройство верификации болусов может применяться в задаче проверки геометрических параметров болусов для лучевой терапии, гарантируя высокую точность измерений.

To make the dose distribution of the proton beam conformal to the distal edge of the target, a bolus — a range shifter of complex shape — is calculated and then manufactured. The quality assurance of proton compensators used in patient treatment is a vital issue in proton therapy. We describe a method to verify the quality of the boluses used in proton therapy by implementing a new software-hardware device, based on two photoelectric sensors and a moving system. The device determines the quality of a bolus by specifying and measuring the depth of all the compensator's points. We evaluated twenty boluses used in proton therapy for five patients. A total number of 2562 points on the mentioned boluses were measured and not all passed the tests. We obtained two inaccurate manufactured points with the values more than 0.5 mm. For all the rest of the points the accuracy was within ± 0.5 mm. The hardware-software system can be used for checking the quality assurance for proton compensators with high precision.

PACS: 87.56.-v; 87.56.ng; 87.56.Fc

ВВЕДЕНИЕ

Протонная лучевая терапия является одним из перспективных и, в некоторых случаях, единственным методом лечения онкологических заболеваний. Это связано с выраженными преимуществами дозного распределения пучков этих частиц и особенностями их

¹E-mail: shipulin@jinr.ru

биологического воздействия на организм. Минимизируя дозу на окружающие здоровые ткани, протонная терапия позволяет доставить более высокую дозу на опухоль, что дает возможность облучать ранее недоступные для стандартной лучевой терапии локализации.

В настоящее время в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ в Медико-техническом комплексе (МТК), созданном на базе фазотрона, реализована и применяется в сеансах радиотерапии техника трехмерного конформного облучения глубоко залегающих опухолей протонным пучком [1].

Для придания конформности дозного распределения протонного пучка форме мишени пучок проходит через различные формирующие устройства (гребенчатый фильтр, коллиматор, болюс), установленные на терапевтическом стенде в первой процедурной кабине МТК (рис. 1).

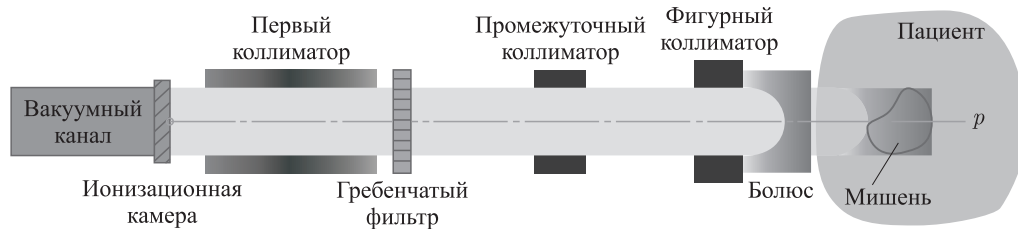


Рис. 1. Система формирования терапевтического протонного пучка

При прохождении пучка протонов через ткани пациента на его пути встречаются различные неоднородности: сосуды, воздушные полости, кости и др. При этом искажается фронт пучка, а также равномерность распределения дозы на мишени. Для частичной компенсации этих нежелательных эффектов при проведении трехмерной конформной протонной терапии используются болюсы — рассчитанные компьютерной программой планирования компенсаторы неоднородностей, устанавливаемые непосредственно перед пациентом (рис. 1). Использование этого устройства вместе с индивидуальным фигурным коллиматором позволяет сформировать пространственное дозное распределение так, чтобы оно наилучшим образом соответствовало форме мишени и создавало минимальную лучевую нагрузку на близлежащие здоровые ткани и критические структуры (например, ствол головного мозга, зрительные нервы и др.).

Физические основы применения болюсов заключаются в том, что протоны, проходя через вещество, теряют свою энергию, и вследствие этого сокращается длина их остаточного пробега. Так как толщина болюса неоднородна в сечении, то протоны, прошедшие через болюс, выходят из него с разными энергиями. Болюс рассчитывается из тех соображений, чтобы сформированное дозное распределение резко спадало за задним краем мишени [1].

Важным этапом обеспечения гарантии качества процесса производства болюсов является их последующая проверка (верификация) [2]. Процедура проверки болюса заключается в измерении толщин в различных точках его сечения и сопоставлении их с рассчитанными программой планирования.

Ранее в МТК практиковалась методика дозиметрической проверки. Данная проверка заключалась в измерении глубинно-дозного распределения протонного пучка миниатюрным кремниевым детектором после прохождения его через болюс, как правило, по оси

пучка. Однако для проверки одного болюса требовалось значительное время работы ускорителя и, как следствие, дополнительное потребление электроэнергии. Кроме того, точность такой проверки оставляла желать лучшего, так как не обеспечивала контроль изготовленного болюса по всему сечению.

Целью данной работы являлась разработка программно-аппаратного комплекса для проведения верификации качества и точности изготовления болюсов в МТК.

В ходе разработки нового устройства верификации болюсов (УВБ) была выработана следующая его концепция:

1. Наличие двух оптических датчиков (ОД) измерения расстояния с точностью измерения не хуже $\pm 0,5$ мм.
2. 2D-система перемещения датчиков с точностью позиционирования не хуже $\pm 0,5$ мм.
3. Персональный компьютер со специализированным программным обеспечением.

1. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Изготовление болюсов проводится в мастерских МТК на сверлильно-фрезерном станке SyilX4 [3] с числовым программным управлением по рассчитанным параметрам сечения болюса в результате компьютерного моделирования протонного облучения. В настоящий момент моделирование протонного облучения ведется на двух системах планирования: TPN, разработанной в первом в мире госпитальном центре протонной терапии в г. Лома-Линда (США) [4] и адаптированной к оборудованию и протонным пучкам фазотрона ЛЯП ОИЯИ [5], и Pln3D, разработанной в МТК ОИЯИ (данная программа планирования в настоящее время проходит тестирование в сеансах протонной терапии). Выходные матрицы болюсов с этих программ планирования имеют некоторые различия (рис. 2), что необходимо учитывать при проверке болюсов.

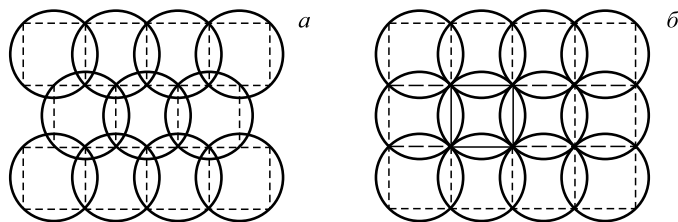


Рис. 2. Различия в формировании болюсов между программами планирования TPN (а) и Pln3D (б) соответственно. Штриховая линия — область расположения расчетных точек болюса, сплошная линия — область обработки данных точек

Разработанное устройство для верификации болюсов состоит из двумерной системы перемещения (СП) DriveSet 202B фирмы «Systec» [6], на которой закреплены два оптических датчика LS5 фирмы НПО «Призма» [7], работающих по принципу отражения (триангуляция). Характеристики оборудования приведены в таблице.

Оба датчика закреплены на каретке СП под углом 180° друг к другу. Принцип работы триангуляционных датчиков представлен на рис. 3.

Система перемещения DriveSet 202B	
Точность позиционирования, мм	$\pm 0,1$
Перемещение по оси X, мм	160
Перемещение по оси Y, мм	160
Интерфейс	USB2.0
Датчики LS5	
Точность измерения датчиков, мм	$\pm 0,15$
Ближняя граница измерения, мм	50
Диапазон измерения, мм	150
Дискретность, мм	0,01
Поперечный размер светового пятна, мм	2,5
Интерфейс	RS485

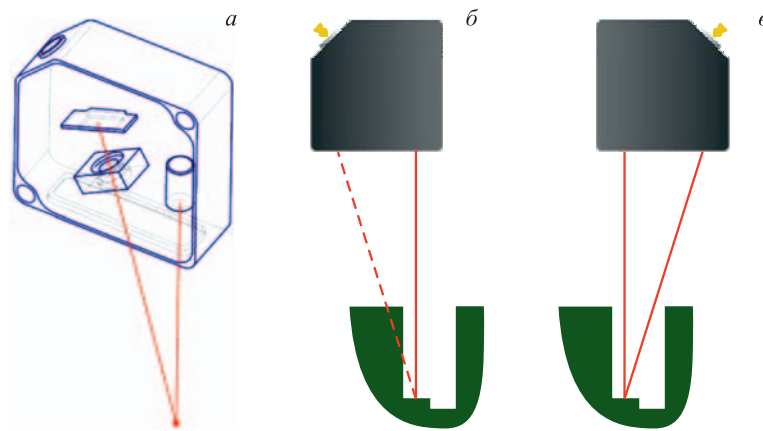


Рис. 3. а) Принцип работы триангуляционного датчика; б) отсутствие сигнала от первого датчика; в) измерение той же точки вторым датчиком

Лазер посылает через линзу луч, который отражается от объекта и фокусируется на ПЗС-матрице. Всякое изменение расстояния до объекта вызывает изменение позиции отраженного луча на линейке чувствительных элементов. Микроконтроллер обрабатывает сигнал от линейки фотодиодов и преобразует его в цифровой код, который поступает в ПК.

Из рис. 3, б видно, что в случае значительных градиентов толщины болюса не все измеряемые точки могут быть адекватно обработаны только одним датчиком. Избежать данной проблемы позволит применение второго датчика с такими же характеристиками и расположенного встречно к первому. Такая схема позволяет провести измерение практически всей поверхности болюса (рис. 3, в).

Общая схема УВБ выглядит следующим образом (рис. 4). На стальной станине установлены пазы для крепления болюса, такие же, как и на станине станка с ЧПУ при изготовлении. Эти пазы используются также для центрации болюсов на лучевом стенде при проведении радиотерапии. Над стальной станиной на высоте 145 мм жестко закреплена СП. Центр перемещения каретки по двум координатам СП находится над

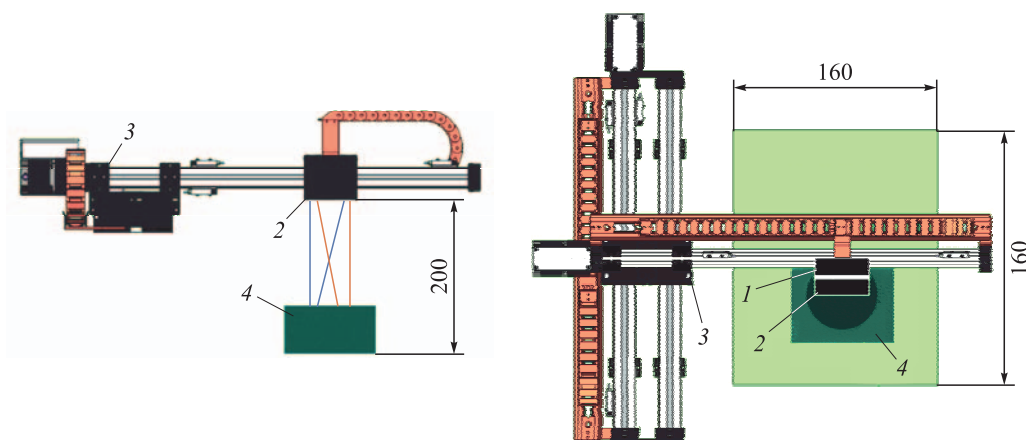


Рис. 4. Внешний вид устройства верификации болюсов. 1 — первый оптический датчик; 2 — второй оптический датчик; 3 — СП; 4 — болюс

центром болюса, так чтобы она охватывала всю площадь фрезеровки. На высоте 200 мм от станины на каретке СП параллельно закреплены два ОД под углом 180° друг к другу. СП посредством собственного драйвера Хето [6] сопряжена с персональным компьютером (ПК) по интерфейсу USB2.0. ОД также сопряжены с ПК через преобразователь интерфейсов АС4 с RS485 на USB2.0 фирмы ОВЕН [8].

Верификация проводится поэтапно. Перед началом измерений на стальную станину в направляющие пазы устанавливается болюс. Далее в специально разработанную компьютерную программу загружаются цифровые данные рассчитанного программой планирования болюса, и по команде с компьютера на датчики и систему перемещения посылается команда на начало измерений. СП смещает ОД на точку проверки (фрезеровки), ОД производит измерение, и затем СП смещает ОД на следующую точку. Таким образом проводится проверка всех точек фрезеровки болюса последовательно каждым датчиком.

Для управления устройством было разработано специализированное программное обеспечение (рис. 5). Данное программное обеспечение позволяет синхронизировать с персональным компьютером СП и ОД, калибровать ОД, а также контролировать работу УВБ в реальном времени. Для вывода различных данных на экран предусмотрена возможность выбора трех режимов измерения, таких как 1) глубина фрезеровки; 2) высота оставшегося материала после фрезеровки; 3) разница между рассчитанным и измеренным значением. Во время верификации болюса ведется статистика результатов, учитывающая: 1) общее количество точек проверки в болюсе; 2) количество корректных точек; 3) количество не определенных точек; 4) количество некорректных точек; 5) процентное соотношение некорректных точек; 6) максимальное значение несоответствия в точке; 7) минимальное значение несоответствия в точке.

Результатом проверки болюса является цветовая схема на экране монитора компьютера (рис. 6, б), позволяющая геометрически оценить точность изготовления в зависимости от цвета точки, статистика проверки, а также цифровой файл с результатами измерений, хранящийся в архиве для каждого пациента.

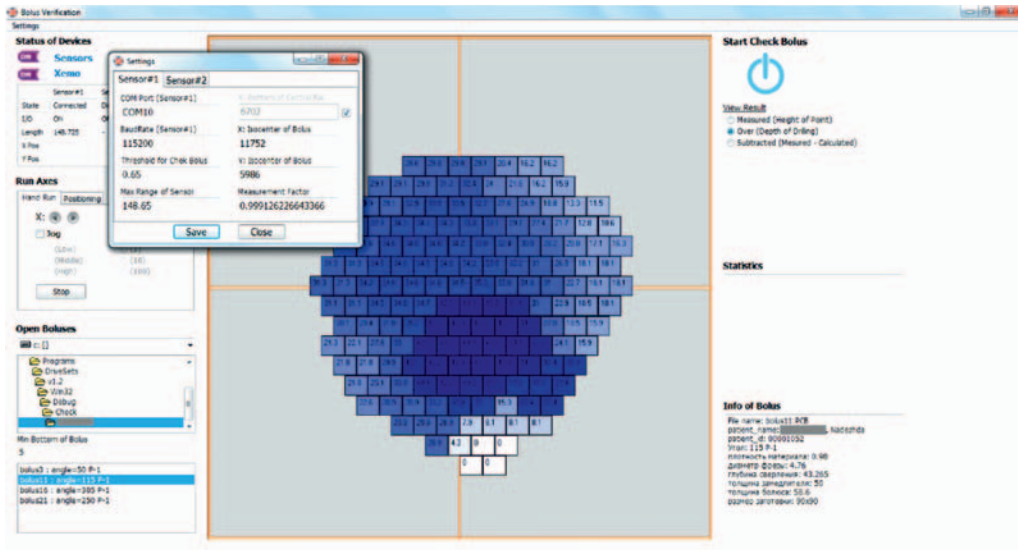


Рис. 5 (цветной в электронной версии). Вид окна программного обеспечения для управления устройством верификации болюсов

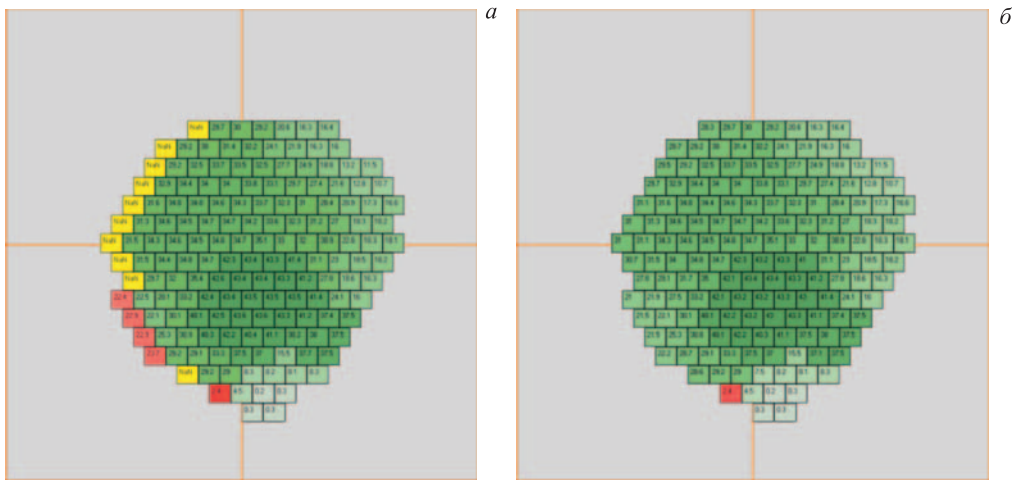


Рис. 6 (цветной в электронной версии). Результат проверки болюса: а) результат проверки болюса после измерения первым ОД; б) суммарный результат проверки болюса после измерения вторым ОД. Зеленый цвет — точка находится в диапазоне $\pm 0,5$ мм от исходного; желтый — нет сигнала с датчика; красный — значение в этой точке превышает порог 0,5 мм

2. РЕЗУЛЬТАТЫ

В ходе эксперимента были проверены 20 болюсов пяти пациентов. Общее количество измеренных точек составило 2562. На рис. 7 представлена гистограмма отклонений всех измеренных точек. Из всех измеренных точек только две имели значение, отличное от

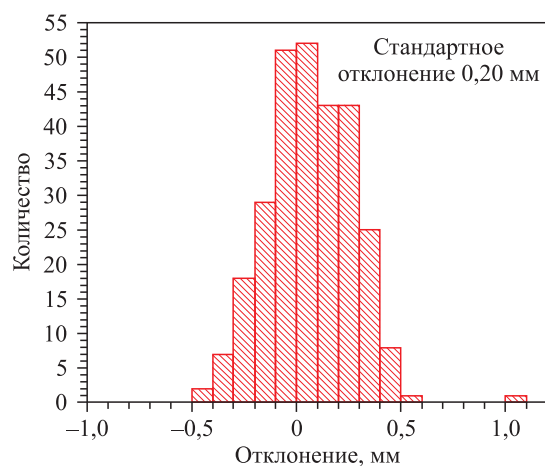


Рис. 7. Гистограмма отклонений всех точек проверенных болюсов

расчетного более чем на 0,5 мм. Первая точка имела отклонение от расчетного 0,6 мм, вторая 1 мм. Данные точки лежат вне поля облучения на краю болюса за гранью апертуры коллиматора и не вносят искажений в суммарное дозное распределение. Для всех остальных точек отклонение от расчетного значения находилось в пределах $\pm 0,5$ мм, что соответствует заявленной точности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В МТК ЛЯП ОИЯИ создано устройство верификации болюсов, отвечающее всем предъявляемым требованиям, которое может применяться в решении задачи проверки геометрических параметров болюсов для лучевой терапии, гарантируя высокую точность измерений, что является важным этапом в обеспечении гарантии качества прецизионной протонной лучевой терапии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Агапов А. В. и др. Технология расчета и изготовления устройств формирования протонного пучка в радиотерапии // Письма в ЭЧАЯ. 2012. Т. 9, № 6–7(176–177). С. 924–936.
2. Zhao Q., Wu H., Das I. J. Quality Assurance of Proton Compensators / Ed. M. Long. World Congress on Medical Physics and Biomedical Engineering; IFMBE Proc. V. 39. P. 1719-1722, 2013.
3. <http://www.syil.ru>
4. <http://www.protons.com>
5. Агапов А. В. и др. Методика трехмерной конформной протонной лучевой терапии // Письма в ЭЧАЯ. 2005. Т. 2, № 6(129). С. 80–86.
6. <http://www.drivesets.de/>
7. <http://www.prizmasensorsru/>
8. <http://www.owen.ru/>

Получено 24 июля 2014 г.