ГАРАНТИЯ КАЧЕСТВА ВОДНЫХ ДОЗИМЕТРИЧЕСКИХ ФАНТОМОВ

Ж.С. Лебедева¹, Д.И. Гранин², П.А. Медведев², О.В. Пашков³ ¹ Первый Санкт-Петербургский государственный медицинский университет им. И.П. Павлова, Санкт-Петербург ² ООО "Градиация", Санкт-Петербург ³ ООО "Технологии гарантии качества", Санкт-Петербург

СОДЕРЖАНИЕ Введение Действующие рекомендации Позиционирование детектора и фантома Детекторы и электроника Получение сканированных дозиметрических данных Выходные данные Сравнение коммерчески доступных фантомов Заключение Ключевые слова: водный дозиметрический фантом, гарантия качества, процентно-глубинная

ключевые слова: вооный оозиметрический фантом, гарантия качества, процентно-глубинная доза, профиль пучка, приемо-сдаточные испытания, электрометр, ионизационная камера DOI: 10.52775/1810-200X-2022-96-4-81-88

Введение

Значимость качественного сбора первичных дозиметрических данных сложно переоценить. В работе [1] показано, как вариативность в сборе данных влияет на модель пучка в системе дозиметрического планирования. Опорным документом для сбора корректных данных является протокол ААРМ TG-106 [2]. Основным инструментом сбора данных является водный дозиметрический фантом. Очевидно, что как радиационный аппарат и дозиметрическое оборудование для абсолютной дозиметрии, водный дозиметрический фантом требует проведения понятной и документированной процедуры приемо-сдаточных испытаний, а также периодической проверки. Этот постулат был обозначен в 1990 г. в работе [3]. Приведённый в этой работе список обязательных тестов при приемо-сдаточных испытаниях является базовым и также применяется при сравнениях нескольких дозиметрических фантомов [4, 5].

Действующие рекомендации

Основные группы параметров, описанные в работе [3], которые требуют проверки:

- ✓ Проверка позиционирования детектора
- 🗸 Проверка работы детекторов и электроники
- ✓ Проверка дозиметрических данных, получаемых при сканировании
- ✓ Проверка выходных данных.

В работе [3] приведены результаты измерений для системы Welhofer WP-600 и RFA-3. И, вероятно, полученные данные можно использовать в качестве опорных при определении толерантных уровней, но прямых указаний по этому поводу нет. Некоторые рекомендации относительно толерантных уровней, а также периодичности тестов представлены в работе [6], в которой также впервые на русском языке представлен и список тестов из работы [3].

С момента написания приведенных выше работ прошло значительное количество времени.

Технологический уровень и механическая точность механизмов, применяемых в водных фантомах, возросла. Изменился также и формат вывода данных и работы с ними. Поэтому авторы данной статьи считают полезным представить расширенный список тестов и толерантных уровней, основанных на современных технологических возможностях. Тесты, описанные в работе [3], совместно с предложенными авторами данной работы (выделены курсивом) представлены в табл. 1. Отметим также, что как отмечают сами авторы работы [3], данный список не является всеобъемлющим и применим лишь в определенных ситуациях. Так, тесты З.Д и З.Е (выделены жирным шрифтом) могут бы выполнены при наличии в клинике второго водного дозиметрического фантома, что не всегда возможно.

В процессе приемо-сдаточных испытаний в клинике производитель обычно демонстрирует параметры системы, заявленные в технических условиях:

- максимальный сканируемый с помощью ионизационной камеры объём;
- 2) типы сканирования;
- 3) минимальный шаг перемещения датчика;
- 4) скорость сканирования;
- 5) длина кабеля между контроллером и движущимся механизмом;
- 6) скорость и высота подъёма тележки;
- 7) скорость слива воды из хранилища;
- 8) наличие контроля позиционирования;
- 9) возможности ПО.

Данные испытания, свидетельствующие о факте соответствия заявленной комплектации, должны быть дополнены тестами, представленными в табл. 1.

Позиционирование детектора и фантома

В этом и следующих трех разделах будет рассмотрена методика выполнения, описанных в табл. 1 тестов.

Tecm 1.А (выравнивание) может быть проделан с использованием отвеса. Фантом без воды устанавливается по внешнему уровню. Отвес устанавливается в центре каретки и с отступом на максимальную и минимальную длину по ходу каретки. Относительно разметки на дне фантома фиксируется разворот каретки, продольный и поперечный наклон. *Tecm 1.Б (воспроизводимость)* может быть проделан с использованием индикатора (см. рис. 1).

- На расстоянии, приблизительно равном половине хода направляющей от центра фантома до крайнего положения по оси X, в пустом водном резервуаре размещается штатив с индикатором часового типа (или электронный) таким образом, чтобы шток индикатора располагался вдоль исследуемой оси.
- 2. Каретка подводится к штоку индикатора таким образом, чтобы показания индикатора оказались в середине его измерительного диапазона.
- 3. Текущая координата исследуемой оси запоминается, показания индикатора обнуляются.
- 4. Каретка отводится в нулевое положение по исследуемой оси, затем программно подводится в сохраненную координату.
- 5. Фиксируется показание индикатора.
- 6. Измерение проводится 10 раз и вычисляется среднее.
- Действия согласно пп. 1–6 повторяются при расположении штатива на различных расстояниях от исходной точки для каждой координатной оси.
- 8. Действия согласно пп. 1–6 повторяются при расположении штатива в одной из максимально удаленных от центра фантома точек, расположенных на диагоналях, так чтобы при движении каретки происходило перемещение по двум координатным осям.

На рис. 1 представлен эксперимент по измерению воспроизводимости по оси Z (глубина) в цилиндрическом фантоме. На рис. 2 представлен эксперимент по измерению воспроизводимости линейных перемещений при повороте каретки (угол θ). Размещение индикатора вдоль рельсы, по которой перемещается каретка, затруднительно, поэтому либо необходимо разместить индикатор над кареткой, а на каретку установить какой-либо держатель для камеры, для того чтобы при перемещении индикатор упирался в него, либо осуществлять перемещения совместно по нескольким координатам.

Тест 1.В (точность) в работе [6] производится при помощи линейки, в работе [5] описано применение штангенциркуля (калипера). Штангенциркуль размещается таким образом, чтобы упираться одним концом в неподвижную структуру (например стенку фантома), производится измерение от стенки, до крайнего положения каретки, дальше каретка отводится в разные положения и фактическое перемещение каретки вычисляется

Таблица 1

Приемочный тест для водного дозиметрического фантома

Тест	Лопустимый уровень погрешности
1. Позиционирование летектора и фантома	допустимый уровень негрешнести
А Выравнивание	1 мм
Б. Воспроизволимость	I MIM
1) $\mu_3(0, 0, 0) \approx (0, 0, Z_{max}/2) = 10 \text{ page}$	
2) $\mu_3(0,0,0) = (0,0,2) = (0,0,2) = (0,0,0) $	0.1 мм
3) $\mu_3(0,0,0) B(X_{max}/2,0,0) 10 pas$	0,1 MM
4) $\mu_3(0,0,0) = (X_{max}, Y_{max}, Z_{max}/2) = 10 \text{ page}$	
B TOUHOCTE	0.1 MM
Г. Автоистановка фантома	
П. Автоматический слив воды для работы с ТРР	
2. Летекторы и электроника	1 MIM
Стабильность высокого напряжения	Доступна установка во всём диапазоне
Б. Воспроизволимость показаний камеры	0.2 %
D. Боспроизводимоств показании камеры	0,270 Лля кралратных полей не более 0.3%
В. Эффект держателя	для прямоугольных не более 2%
Г. Ток утечки в камере и кабеле	Соответствует ТУ
Л Кабель и усиление чувствительности к облучению	_
3. Получение сканированных дозиметрических данных	
А Влияние скорости сканирования	1% (вобласти накопления дозы до 2%)
Б. Влияние спорости сканирования	1% (в области накопления дозы до 2%)
В. Согласование раубинной кривой влодь центральной оси со	1 70 (в области накопления дозві до 2 70)
В. Согласование плубинной кривой вдоль центральной оси со «статическими» измерениями	1 %
<u>«Статическими» измерения стубинной кривой влоде</u>	
иентральной оси	0,5 %
Л Согласование данных по радиальным и трансверсальным	
д. согласование данных по радизывным и грансверсальным	1 %, 1 мм
Е. Согласование изолозных характеристик с другими	
ланными сканирования	1 %, 1 мм
	0 -
Ж. Гистерезис при съемке профиля и глибинного распределения	0.5 MM
Ж. Гистерезис при съемке профиля и глубинного распределения 4. Выхолные ланные	0,5 MM
 Ж. Гистерезис при съемке профиля и глубинного распределения 4. Выходные данные А. Обработка ланных 	0,5 MM
 Ж. Гистерезис при съемке профиля и глубинного распределения 4. Выходные данные А. Обработка данных Перенормировка 	0,5 MM
 Ж. Гистерезис при съемке профиля и глубинного распределения 4. Выходные данные А. Обработка данных 1) Перенормировка 2) Центрация 	0,5 MM
 Ж. Гистерезис при съемке профиля и глубинного распределения 4. Выходные данные А. Обработка данных 1) Перенормировка 2) Центрация 3) Сглаживание 	0,5 MM
 Ж. Гистерезис при съемке профиля и глубинного распределения 4. Выходные данные А. Обработка данных 1) Перенормировка 2) Центрация 3) Сглаживание 4) Симметризация 	0,5 MM
Ж. Гистерезис при съемке профиля и глубинного распределения 4. Выходные данные А. Обработка данных 1) Перенормировка 2) Центрация 3) Сглаживание 4) Симметризация 5) Смещение	0,5 MM
Ж. Гистерезис при съемке профиля и глубинного распределения 4. Выходные данные А. Обработка данных 1) Перенормировка 2) Центрация 3) Сглаживание 4) Симметризация 5) Смещение 6) Интерполяция	0,5 MM
Ж. Гистерезис при съемке профиля и глубинного распределения 4. Выходные данные А. Обработка данных 1) Перенормировка 2) Центрация 3) Сглаживание 4) Симметризация 5) Смещение 6) Интерполяция 7) Поворот	Работает корректно
Ж. Гистерезис при съемке профиля и глубинного распределения 4. Выходные данные А. Обработка данных 1) Перенормировка 2) Центрация 3) Сглаживание 4) Симметризация 5) Смещение 6) Интерполяция 7) Поворот 8) Отражение	0,5 мм Работает корректно
Ж. Гистерезис при съемке профиля и глубинного распределения 4. Выходные данные А. Обработка данных 1) Перенормировка 2) Центрация 3) Сглаживание 4) Симметризация 5) Смещение 6) Интерполяция 7) Поворот 8) Отражение 9) Шкалирование	0,5 мм Работает корректно
Ж. Гистерезис при съемке профиля и глубинного распределения 4. Выходные данные А. Обработка данных 1) Перенормировка 2) Центрация 3) Сглаживание 4) Симметризация 5) Смещение 6) Интерполяция 7) Поворот 8) Отражение 9) Шкалирование 10) Усреднение профилей	0,5 мм Работает корректно
Ж. Гистерезис при съемке профиля и глубинного распределения 4. Выходные данные А. Обработка данных 1) Перенормировка 2) Центрация 3) Сглаживание 4) Симметризация 5) Смещение 6) Интерполяция 7) Поворот 8) Отражение 9) Шкалирование 10) Усреднение профилей 11) Сшивка профилей	0,5 мм Работает корректно
Ж. Гистерезис при съемке профиля и глубинного распределения 4. Выходные данные А. Обработка данных 1) Перенормировка 2) Центрация 3) Сглаживание 4) Симметризация 5) Смещение 6) Интерполяция 7) Поворот 8) Отражение 9) Шкалирование 10) Усреднение профилей 11) Сшивка профилей 12) Слияние профилей	Работает корректно
Ж. Гистерезис при съемке профиля и глубинного распределения 4. Выходные данные А. Обработка данных 1) Перенормировка 2) Центрация 3) Сглаживание 4) Симметризация 5) Смещение 6) Интерполяция 7) Поворот 8) Отражение 9) Шкалирование 10) Усреднение профилей 11) Сшивка профилей 12) Слияние профилей 13) Другое	Работает корректно
Ж. Гистерезис при съемке профиля и глубинного распределения 4. Выходные данные А. Обработка данных 1) Перенормировка 2) Центрация 3) Сглаживание 4) Симметризация 5) Смещение 6) Интерполяция 7) Поворот 8) Отражение 9) Шкалирование 10) Усреднение профилей 11) Сшивка профилей 12) Слияние профилей 13) Другое Б. Анализ дозиметрических данных	Работает корректно
Ж. Гистерезис при съемке профиля и глубинного распределения 4. Выходные данные А. Обработка данных 1) Перенормировка 2) Центрация 3) Сглаживание 4) Симметризация 5) Смещение 6) Интерполяция 7) Поворот 8) Отражение 9) Шкалирование 10) Усреднение профилей 11) Сшивка профилей 12) Слияние профилей 13) Другое Б. Анализ дозиметрических данных 1) Расчёт симметрии для электронов и фотонов	О,5 ММ Работает корректно
 Ж. Гистерезис при съемке профиля и глубинного распределения 4. Выходные данные А. Обработка данных 1) Перенормировка 2) Центрация 3) Сглаживание 4) Симметризация 5) Смещение 6) Интерполяция 7) Поворот 8) Отражение 9) Шкалирование 10) Усреднение профилей 11) Сшивка профилей 12) Слияние профилей 13) Другое Б. Анализ дозиметрических данных 1) Расчёт симметрии для электронов и фотонов 2) Расчёт однородности поля для электронов и фотонов 	О,5 ММ Работает корректно
 Ж. Гистерезис при съемке профиля и глубинного распределения 4. Выходные данные А. Обработка данных 1) Перенормировка 2) Центрация 3) Сглаживание 4) Симметризация 5) Смещение 6) Интерполяция 7) Поворот 8) Отражение 9) Шкалирование 10) Усреднение профилей 11) Сишвка профилей 12) Слияние профилей 13) Другое Б. Анализ дозиметрических данных 1) Расчёт симметрии для электронов и фотонов 2) Расчёт однородности поля для электронов и фотонов 3) Пересчёт из кривой ионизации в процентно-глубинную дозу 	О,5 ММ Работает корректно
 Ж. Гистерезис при съемке профиля и глубинного распределения 4. Выходные данные А. Обработка данных 1) Перенормировка 2) Центрация 3) Сглаживание 4) Симметризация 5) Смещение 6) Интерполяция 7) Поворот 8) Отражение 9) Шкалирование 10) Усреднение профилей 11) Сшивка профилей 12) Слияние профилей 13) Другое Б. Анализ дозиметрических данных 1) Расчёт симметрии для электронов и фотонов 3) Пересчёт из кривой ионизации в процентно-глубинную дозу 4) Расчёт размеров пучка 	0,5 мм Работает корректно 1 %
 Ж. Гистерезис при съемке профиля и глубинного распределения 4. Выходные данные А. Обработка данных 1) Перенормировка 2) Центрация 3) Сглаживание 4) Симметризация 5) Смещение 6) Интерполяция 7) Поворот 8) Отражение 9) Шкалирование 10) Усреднение профилей 11) Сшивка профилей 12) Слияние профилей 13) Другое Б. Анализ дозиметрических данных 1) Расчёт симметрии для электронов и фотонов 3) Пересчёт из кривой ионизации в процентно-глубинную дозу 4) Расчёт загрязнения фотонами электронного пучка 	0,5 мм Работает корректно 1 %
 Ж. Гистерезис при съемке профиля и глубинного распределения 4. Выходные данные А. Обработка данных 1) Перенормировка 2) Центрация 3) Сглаживание 4) Симметризация 5) Смещение 6) Интерполяция 7) Поворот 8) Отражение 9) Шкалирование 10) Усреднение профилей 11) Сшивка профилей 12) Слияние профилей 13) Другое Б. Анализ дозиметрических данных 1) Расчёт симметрии для электронов и фотонов 3) Пересчёт из кривой ионизации в процентно-глубинную дозу 4) Расчёт размеров пучка 5) Расчёт положения пика Брэгга для протонов 	0,5 мм Работает корректно 1 %
 Ж. Гистерезис при съемке профиля и глубинного распределения 4. Выходные данные А. Обработка данных 1) Перенормировка 2) Центрация 3) Сглаживание 4) Симметризация 5) Смещение 6) Интерполяция 7) Поворот 8) Отражение 9) Шкалирование 10) Усреднение профилей 11) Сшивка профилей 12) Слияние профилей 13) Другое Б. Анализ дозиметрических данных 1) Расчёт симметричи для электронов и фотонов 3) Пересчёт из кривой ионизации в процентно-глубинную дозу 4) Расчёт загрязнения фотонами электронного пучка 6) Расчёт Пря 	0,5 мм Работает корректно 1 %
 Ж. Гистерезис при съемке профиля и глубинного распределения 4. Выходные данные А. Обработка данных 1) Перенормировка 2) Центрация 3) Сглаживание 4) Симметризация 5) Смещение 6) Интерполяция 7) Поворот 8) Отражение 9) Шкалирование 10) Усреднение профилей 11) Сшивка профилей 12) Слияние профилей 13) Другое Б. Анализ дозиметрических данных 1) Расчёт симметрии для электронов и фотонов 2) Расчёт однородности поля для электронов и фотонов 3) Пересчёт шз кривой ионизации в процентно-глубинную дозу 4) Расчёт размеров пучка 5) Расчёт загрязнения фотонами электронного пучка 6) Расчёт ПРR 8) Построение таблицы радиационных выходов 	0,5 мм Работает корректно 1 %
 Ж. Гистерезис при съемке профиля и глубинного распределения 4. Выходные данные А. Обработка данных 1) Перенормировка 2) Центрация 3) Сглаживание 4) Симметризация 5) Смещение 6) Интерполяция 7) Поворот 8) Отражение 9) Шкалирование 10) Усреднение профилей 11) Сшивка профилей 12) Слияние профилей 13) Другое Б. Анализ дозиметрических данных 1) Расчёт симметрии для электронов и фотонов 3) Пересчёт из кривой ионизации в процентно-глубинную дозу 4) Расчёт размеров пучка 5) Расчёт таятрязнения фотонами электронного пучка 6) Расчёт ПРК 8) Построение таблицы радиационных выходов В. Экспорт данных 	0,5 мм Работает корректно 1 %
 Ж. Гистерезис при съемке профиля и глубинного распределения 4. Выходные данные А. Обработка данных 1) Перенормировка 2) Центрация 3) Сглаживание 4) Симметризация 5) Смещение 6) Интерполяция 7) Поворот 8) Отражение 9) Шкалирование 10) Усреднение профилей 11) Сшивка профилей 12) Слияние профилей 13) Другое Б. Анализ дозиметрических данных 1) Расчёт симметрии для электронов и фотонов 2) Расчёт однородности поля для электронов и фотонов 3) Пересчёт из кривой ионизации в процентно-глубинную дозу 4) Расчёт загрязнения фотонами электронного пучка 6) Расчёт положения пика Брэгга для протонов 7) Расчёт ПРR 8) Построение таблицы радиационных выходов В. Экспорт данных 1) Вывод в кодировке ASCII 	Работает корректно
 Ж. Гистерезис при съемке профиля и глубинного распределения 4. Выходные данные А. Обработка данных 1) Перенормировка 2) Центрация 3) Сглаживание 4) Симметризация 5) Смещение 6) Интерполяция 7) Поворот 8) Отражение 9) Шкалирование 10) Усреднение профилей 11) Сшивка профилей 12) Слияние профилей 13) Другое Б. Анализ дозиметрических данных 1) Расчёт симметрии для электронов и фотонов 3) Пересчёт из кривой ионизации в процентно-глубинную дозу 4) Расчёт загрязнения фотонами электронного пучка 6) Расчёт положения пика Брэгга для протонов 7) Расчёт ПРR 8) Построение таблицы радиационных выходов В. Экспорт данных 1) Вывод в кодировке ASCII 2) Вывод для разных систем планирования 	0,5 мм Работает корректно 1 % Работает корректно
 Ж. Гистерезис при съемке профиля и глубинного распределения 4. Выходные данные А. Обработка данных 1) Перенормировка 2) Центрация 3) Сглаживание 4) Симметризация 5) Смещение 6) Интерполяция 7) Поворот 8) Отражение 9) Шкалирование 10) Усреднение профилей 11) Сшивка профилей 12) Слияние профилей 13) Другое Б. Анализ дозиметрических данных 1) Расчёт симметрии для электронов и фотонов 3) Пересчёт из кривой ионизации в процентно-глубинную дозу 4) Расчёт размеров пучка 5) Расчёт загрязнения фотонами электронного пучка 6) Расчёт положения пика Брэгга для протонов 7) Расчёт ПРК 8) Построение таблицы радиационных выходов В. Экспорт данных 1) Вывод в кодировке ASCII 2) Вывод для разных систем планирования 3) Передача данных по сети 	0,5 мм Работает корректно 1 % Работает корректно
 Ж. Гистерезис при съемке профиля и глубинного распределения 4. Выходные данные А. Обработка данных 1) Перенормировка 2) Центрация 3) Сглаживание 4) Симметризация 5) Смещение 6) Интерполяция 7) Поворот 8) Отражение 9) Шкалирование 10) Усреднение профилей 11) Сшивка профилей 12) Слияние профилей 13) Другое Б. Анализ дозиметрических данных 1) Расчёт симметрии для электронов и фотонов 2) Расчёт симметрии для электронов и фотонов 3) Пересчёт из кривой ионизации в процентно-глубинную дозу 4) Расчёт размеров пучка 5) Расчёт положения пика Брэгга для протонов 7) Расчёт ПРК 8) Построение таблицы радиационных выходов В. Экспорт данных 1) Вывод в кодировке АSCII 2) Вывод для разных систем планирования 3) Передача данных по сети Г. Сравнение данных 	0,5 мм Работает корректно 1 % Работает корректно Совпадает с данными внешних



Рис. 1. Подготовка к эксперименту по измерению воспроизводимости по оси Z (глубина) в цилиндрическом фантоме (индикатор выведен на ось)

по формуле: $dX = X_1 - X_2$. Измерение производится не менее чем в 2–3 длинах по каждой из осей, в различных частях фантома. Более точное измерение можно произвести при помощи штихмаса (см. рис. 3) и штангенрейсмаса (см. рис. 4) по схеме описанной ниже.

Для горизонтальных осей:

- 1. Каретку переместить в любое крайнее положение по исследуемой оси.
- 2. Штихмасом измерить расстояние от стенки резервуара до торца каретки, записать полученное значение.
- 3. Переместить каретку в противоположное предельное положение.
- 4. Штихмасом измерить тоже расстояние, в случае, если расстояние меньше минимального предела измерения штихмаса, расстояние измеряется концевыми мерами длины;
- 5. Фактическое перемещение каретки вычисляется по формуле: $dX = X_1 X_2$.



Рис. 2. Эксперимент по измерению воспроизводимости линейных перемещений при повороте каретки (угол θ) в цилиндрическом фантоме

6. Полученное значение не должно отличаться от указанного в паспорте на величину более указанной в паспорте.

Для вертикальной оси:

- 1. В пустом резервуаре разместить штангенрейсмас.
- 2. Каретку переместить в предельное верхнее положение.
- 3. Штангенрейсмасом измерить расстояние от дна резервуара до верхней грани каретки, записать полученное значение.
- 4. Переместить каретку в крайнее нижнее положение.
- 5. Штангенрейсмасом измерить расстояние от дна резервуара до верхней грани каретки, записать полученное значение.
- 6. Фактическое перемещение каретки вычисляется по формуле $dZ = Z_1 Z_2$.
- 7. Полученное значение не должно отличаться от указанного в паспорте на величину не более указанной в паспорте.



Рис. З. а) штихмас, б) штангенрейсмас, в) концевые меры длины

Tecm 1.Г (автоустановка фантома) применим для фантомов, в которых поддерживается данный режим. Результаты должны быть не хуже тех, что получены при ручной установке.

В некоторых фантомах предусмотрена специальная опция для автоматического слива воды до необходимого уровня, что используется для измерения TPR (Tissue-Phantom Ratio). Для многих фантомов автоматический слив воды, проверяемый в *Tecme 1.Д (автоматический слив воды для работы с TPR)* является опцией. Корректность слива воды проверяется разницей между РИП до слива и после слива воды. Для фантомов, оснащенных средством автоматического поиска поверхности воды, можно запомнить уровень воды, после слива повторить процедуру автоматического определения уровня, посчитать разницу.

Детекторы и электроника

Тест 2.А. Необходимо удостовериться, что возможна подача высокого напряжения на камеру для всего диапазона, допустимого для данного типа камер.

Tecm 2.Б производится не менее чем пятикратными измерениями дозы к точке.

Известно, что показания зависят от длины той части держателя камеры (*mecm 2.B*), которая находится в поле облучения. Этот эффект хорошо исследован и специфичен для камеры, а не фантома. Необходимо исследовать его перед началом эксплуатации. Для камер сканирующего типа (с объёмом до 0,13 см³) и полей более чем 3×3 см он обычно незначителен. Для камер типа Фармера (с объёмом до 0,6 см³) он может достигать 2 % [6]. Данное обстоятельство следует учитывать при точечных измерениях, например, при измерении радиационных выходов прямоугольных полей. Ток утечки в камере и кабеле должен соответствовать значению, представленному в документации на оборудование (*Tecm* 2.Г). Эффект кабеля (*Tecm* 2.Д) можно однократно оценить измерением в режиме, когда значительная часть кабеля находится в непосредственной близости от точки измерения, и сравнением с обычным расположением проводов. Обычно при измерениях удлинительные кабели располагают максимально вне зоны излучения.

Получение сканированных дозиметрических данных

Тест 3.А для определения влияния скорости сканирования в режиме continuous проводится измерением для нескольких скоростей, если их выбор ограничен и для максимальной, минимальной и средней, а также если пользователь имеет возможность её определения. Аналогично для режима сбора данных "шаг за шагом" проверяется влияние времени стояния в точке (*Tecm 3.Б*). При наложении двух кривых друг на друга разница в дозе должна составлять не более 1 %. В области накопления дозы – не более 2 %. На рис. 4 представлен пример наложения двух глубинных распределений, полученных при разных скоростях для фантома 3D Scanner (Sun Nuclear) [5].

Тест 3.В предполагает статические измерения на разных глубинах вдоль центральной оси (например, максимум ионизации, 10, 20, 30 см) и сравнение их с данными, полученными при измерении глубинной дозы. Расхождение по дозе должно составлять не более 1 %. На рис. 5 представлен пример наложения глубинного распределения и измерений в точках. полученных для фантома 3D Scanner (Sun Nuclear) в режиме электрометра той же камерой, которой производится сканирование [5].

85



Рис. 4. Процентно-глубинные распределения дозы, измеренные при разной скорости движения каретки в режиме continuous и рассчитанная разница в дозе для фантома 3D Scanner (Sun Nuclear)[5]

Tecm 3.Г производится снятием кривой в одном и том же направлении несколько раз и дальнейшем сравнении полученных распределений. Расхождение по дозе должно составлять не более 0,5 %.

Тесты 3.Д и 3.Е возможно провести только в ситуации доступа к аналогичному фантому в клинике, что не всегда возможно, поэтому являются опциональными. В случае отсутствия возможности такого сравнения в клинике, желательно ознакомится с литературными данными, сравнивающими данный фантом с аналогами. Данные о таких сравнениях для некоторых фантомов, существующих на российском рынке, представлены в последнем разделе этой статьи.

Tecm 3.Ж производится снятием глубинного распределения в двух направлениях. На практике же глубинное распределение всегда снимается в направлении снизу-вверх.

Выходные данные

Механика современных водных дозиметрических фантомов, как показано ниже, является достаточно точной. Наиболее значимый вклад в изменение формы кривых вносит выбор камеры и обработка первичных данных. Первое обстоятельство не связано с контролем качества самого водного дозиметрического фантома. Выбор камеры и её расположения осуществляется с учётом размера поля, типа излучения, требуемых для системы дозиметрического планирования, первичных данных и особенностей встроенной в неё модели [2, 7]. Второе обстоятельство напрямую связано с встроенными в ПО водного фантома алгорит-



Рис. 5. Процентно-глубинное распределение дозы и измерения в точках (1,5, 5, 10, 20, 30 см), полученных для фантома 3D Scanner (Sun Nuclear)[5]

мами математической обработки и подлежит проверке (Тест 4.А). Для проверки перенормировки, центрации, сглаживания, симметризации, смещения, интерполяции, поворота, отражения, сшивки достаточно сравнения с оригинальным профилем. Для проверки инструментов усреднения и слияния профилей необходима выгрузка их и сравнение с результатами работы во внешнем ПО. Особого внимания заслуживает инструмент шкалирования. Он применяется в тех ситуациях, когда размера фантома недостаточно для сканирования, и состоит в том, что измерение проводится на уменьшенном РИП, а затем проводится пересчёт профиля. Такой подход является альтернативой смещению фантома и снятию полупрофиля (это традиционный подход для фантомов квадратной формы), несущий в себе ошибку механического перемещения. Данная проблема возникает обычно при работе с профилями наибольшего поля классического ускорителя, 40×40 см. Поэтому необходимо произвести измерение для меньших размеров полей, например 30×30 см, с тем РИП, которое планируется применять для измерения максимальных полей, и сравнить его с измерениями со стандартным РИП. В большинстве моделей расстояние от крайнего положения детектора до стенки фантома составляет порядка 5 см, что обеспечивает достижение электронно-фотонного равновесия. В противном случае стоит предпочесть сбор первичных данных для моделирования ускорителя в системе планирования при меньшем РИП, чем классические 100 см. Такая возможность предусмотрена в некоторых планирующих системах.

Так же как и предыдущий, тест 4.Б в табл. 1 дополнен некоторыми методами анали-

за дозиметрических данных, которые представлены в ПО любого современного комплекса. Все расчетные характеристики необходимо проверить ручным расчётом, как минимум для тех протоколов, которые традиционно используются в клинике. В статье [6] тест 4.В носит название "графопостроитель и принтер". Ввиду того, что сейчас данные в основном хранятся в электронном виде, данный тест переименован в "экспорт данных". На этом этапе необходимо проверить выгрузку данных во всех предлагаемых форматах, удостовериться, что происходит выгрузка данных по сети, если она предусмотрена. Проверить, что создаваемый ПО файл с заголовками для конкретных систем планирования корректно читается, включая дополнительную информацию (например, материал фантома при измерениях в воздухе, направление клина и т.д.).

Производители предлагают пользователю возможность проведения анализа гаммаиндекса. Концепция применения гамма-индекса для профилей и глубинных распределений изложена в работах [8, 9]. Корректность алгоритма проверяется анализом гамма-индекса в стороннем ПО [10], предназначенном для этих целей (*mecm 4.Г*). Расхождения в оценках не должны превышать 0,5 %.

Сравнение коммерчески доступных фантомов

Немногочисленные литературные источники, представляющие результаты сравнения измерений для нескольких фантомов, дают обнадеживающие результаты. В работе [4] исследовались четыре водных дозиметрических фантома: Blue Phantom 2 (IBA Dosimetry) с камерой СС13 (IBA Dosimetry), MP3 (PTW) с камерой Semiflex 31010 (PTW), DoseView (Standard Imaging) с камерой Exradin A18 (Standard Imaging), и 3D Scanner (Sun Nuclear) с камерой CC13 (IBA Dosimetry). Все камеры близки по конструкции и объёму. Все полученные измерения демонстрировали сходящиеся до 1 % по дозе в области полутени профили. Наибольшие различия наблюдались при измерении процентно-глубинной дозы в области накопления. Также для разных камер влияние полярности было заметно при глубинах больше 19 см (1 % по дозе). Расхождения в других областях составляло не более 0,5 %. Проведенное исследование было выполнено для одной энергии фотонов и только для поля 10×10 см. Сами авторы отмечают, что значимые аспекты остались за пределами данного исследования: ограниченный размер поля, клинья, электронные пучки, доза в точке, абсолютные измерения. Сюда же следует отнести измерения для фотонов более высоких энергий и протонного пучка, измерения малых полей без рефенсных камер и с проходными референсными камерами, измерения профилей в режиме без сглаживающего фильтра.

Данное исследование скорее позволяет сделать вывод о предельной точности измерений при помощи водных дозиметрических фантомов – 1 % по дозе и 1 мм по расстоянию. А также указывает на тот факт, что современные шаговые двигатели, применяемые в водных фантомах, позволяют достигать бо'льших механических точностей.

Наиболее наглядно последнее обстоятельство представлено в работе [5]. В ней проводилось сравнение фантомов тех же производителей следующих моделей: Blue Phantom, MP3, DoseView, 3D Scanner. В данном исследовании был исключён фактор влияния камеры, поскольку со всеми фантомами использовалась камера Semiflex 31010 (PTW). В нём содержится информация о механических и дозиметрических тестах.

Усредненное по всем трём координатам абсолютное отклонение в позиционировании детектора составило 0,02 мм для DoseView и MP3-M, 0,1 мм для 3D Scanner и 0,03 мм для Blue Phantom.

Различие между процентно-глубинными дозовыми распределениями, снятыми при разных скоростях сканирования, составило: для DoseView – 0,4 %, для MP3-M – 0,38 %, для BluePhantom – 0,8 % и для 3D Scanner – 0,33 %. При варьировании времени сбора заряда различия не превышали 0,5 %.

Статические измерения в точке в сравнении с данными, полученными из процентно-глубинной дозы, показали следующие зна-че-ния: для DoseView – 0,3 %, для MP3-M – 0,7 %, для BluePhantom – 0,7 % и для 3D Scanner – 0,2 %.

Авторы данной работы также провели сканирование процентно-глубинной дозы в направлении сверху–вниз и сравнили его с традиционным движением снизу-вверх. В этой ситуации максимальная разница в области за максимумом ионизации не превышала 0,6 %, в то время как в области накопления она варьировала в пределах 6,6–14,7 %.

Воспроизводимость процентно-глубинной дозы при 5 измерениях за пределами максимума ионизации составила: для DoseView – 0,5 %, для MP3-M – 0,6 %, для BluePhantom – 0,9 % и для 3D Scanner – 0,5 %. При включении области накопления максимальная разница составляла: для DoseView – 1,6 %, для MP3-M – 1,2 %, для BluePhantom – 1,3 % и для 3D Scanner – 5 %.

Влияние направления сканирования на профили: для DoseView – 0,5 %, для MP3-M – 0,5 %, для BluePhantom – 0,7 % и для 3D Scanner – 0,2 %.

Заключение

В работе представлен список тестов, которые необходимо провести при вводе в эксплуатацию водных дозиметрических фантомов. Проведён обзор литературных данных, содержащих информацию о сравнении нескольких коммерчески доступных дозиметрических водных фантомов, что позволило выработать критерии толерантных уровней погрешностей для разных тестов. Данный анализ показал, что в целом правильно настроенный и установленный водный фантом, коммерчески доступный, в том числе на территории РФ, позволяет получить данные, сопоставимые друг с другом в пределах погрешности в 1 % по дозе и 1 мм по расстоянию. Это же значение также определяет предел точности при данной методике измерения. Поскольку не существует эталона, то сравнение дозиметрических данных, полученных на используемых известных фантомах, с результатами новых систем, совместно с результатами тестов из табл. 1, являются достаточными для контроля системы. Перед началом применения необходимо изучить особенности используемого в клинике образца, подобрать оптимальные режимы сканирования и задокументировать данные приемо-сдаточных испытаний для дальнейшего сравнения их с результатами периодических проверок.

Список литературы

- 1. Fogliata A, Esposito E, Paganini L, et al. The impact of scanning data measurements on the Acuros dose calculation algorithm configuration. Radiat Oncol. 2020; 15(1): 1-15.
- 2. Das IJ, Cheng CW, Watts RJ, et al. Report of the TG-106 of the therapy physics committee of the AAPM: accelerator beam data commissioning equipment and procedures. Med Phys. 2008; 35: 4186-215.
- 3. Mellenberg DE, Dahl RA, Blackwell CR. Acceptance testing of an automated scanning water phantom. Med Phys. 1990; 17: 311-4.
- 4. Akino Y, Gibbons JP, Neck DW, et al. Intra- and intervariability in beam data commissioning among water phantom scanning systems. J Appl Clin Med Phys. 2014; 15: 4850.
- 5. Saenz D, et al. Commissioning and cross-comparison of four scanning water tanks. Int J Cancer Ther Oncol. 2020; 4: 415.
- Лебеденко ИМ, Смыслов АЮ, Румянцев ВГ, Москвин НИ, Юхневич ВА. Анализаторы дозного поля. Рекомендации по комплектности и тестированию. Мед. физика. 2004;2 (22): 41-51.
- Gersh JA, Best RC, Watts RJ. The clinical impact of detector choice for Beam Scanning. J App Clin Med Phys. 2014; 15; 4: 174-93.
- 8. Low DA, Harms WB, Mutic S, Purdy JA. Technique for the quantitative evaluation of dose distributions. Med Phys. 1998; 25: 656-61.
- 9. Hrbacek J, Depuydt T, Nulens A, Swinnen A, Van den Heuvel F. Quantitative evaluation of a beam-matching procedure using one-dimensional gamma analysis. Med Phys. 2007; 34(7): 2917-27.
- Pakarinen T, Ojala J. Profeel An Open Source Dosimetry Data Visualization and Analysis Software. Computer Methods and Programs in Biomedicine. 2021, 106457. ISSN 0169-2607. https://doi.org/10.1016/j.cmpb.2021.106457.

THE SCANNING WATER PHANTOM QUALITY ASSURANCE

Zh. S. Lebedeva¹, D.I. Granin², P.A. Medvedev², O.V. Pashkov³ ¹ I.P. Pavlov University, Saint Petersburg, Russia ² Gradiation LTD, Saint Petersburg, Russia ³ Technologies of QA Limited Liability Company, Saint Petersburg, Russia CONTENT Introduction Current recommendations Positioning the detector and phantom Detectors and electronics Scanned dosimetry data acquisition Output Comparison of commercially available phantoms Conclusion Key words: scanning water phantom, quality assurance, PDD, beam profile, commissioning, electrometer, ionization chamber

E-mail: <u>zhanna-med.phys@mail.ru</u>