

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Miller C., Werner P., Jensen C. In situ solidification and encapsulation of commercial nuclear power plant, DOE and DOD wastes. — In: WM'06 Conf. 26 February—2 March 2006, 09-WM-06151.
2. Сбор, переработка, хранение и кондиционирование жидких радиоактивных отходов. Требования безопасности НП-019—15. М., НТЦ ЯРБ, 2015.
3. Критерии приемлемости радиоактивных отходов для захоронения НП-093—14. М., НТЦ ЯРБ, 2015.
4. Рекомендации по установлению критериев приемлемости кондиционированных радиоактивных отходов для их хранения и захоронения РБ-023—02. М., НТЦ ЯРБ, 2001.
5. Отходы радиоактивные. Определение химической устойчивости отвержденных высокоактивных отходов методом длительного выщелачивания. ГОСТ Р 52126—2003. М.: Изд-во стандартов, 2003.
6. Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам. ГОСТ 10180—12. М.: Стандартинформ, 2013.
7. Цементные компаунды на основе радиоактивных отходов. Определение предела прочности на сжатие на испытательной машине марки Testing. Отраслевая инструкция ОИ 001.725—2011. Железногорск, ФГУП «ГХК», 2011.

Поступила в Редакцию 31.07.18

УДК 615.849.1:621.384.64

РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКСА ЛУЧЕВОЙ ТЕРАПИИ НА ОСНОВЕ ЛИНЕЙНОГО УСКОРИТЕЛЯ ЭЛЕКТРОНОВ ЭНЕРГИЕЙ 6 МэВ И КОНУСНО-ЛУЧЕВОГО КОМПЬЮТЕРНОГО ТОМОГРАФА

Родько И.И., Сарычев Г.А. (НИЯУ МИФИ, г. Москва), Балакирев П.В., Бондаренко Т.В., Дергачева И.Л., Евтеев А.С., Ковалев С.Н., Колосков С.А., Крылова Т.А., Лобжанидзе Т.К., Полихов С.А., Смирнов В.П., Шарков Г.Б. (АО «НИИТФА», г. Москва),

Горлачев Г.Е. (ООО «Радиационно-онкологические интеллектуальные системы и сервисы», г. Москва), Гулидов И.В., Иванов С.А., Каприн А.Д., Романко Ю.С., Хмелевский Е.В. (ФГБУ «НМИЦ радиологии», г. Москва), Овчинникова Л.Ю., Шведунов В.И., Шведунов Н.В. (ООО «ЛЭУ МГУ», г. Москва), Чередниченко Д.В. (АО «Росатом Хэлскеа», г. Москва)

Последние десятилетия характеризовались полным прекращением производства отечественных ускорительных комплексов для лучевой терапии. В 1997—2002 гг. в НИИЭФА им. Д.В. Ефремова было организовано серийное производство линейного ускорителя СЛ-75-5-МТ на основе морально устаревших аппаратов компании Philips (Нидерланды). В 2008 г. НИИЭФА приступил к разработке собственной конструкции ускорительного комплекса электронов энергией 6 МэВ. Однако проектирование и изготовление экспериментального образца пришлось на тяжелый период отсутствия финансовой поддержки данной тематики. В результате, несмотря на высокий профессиональный уровень коллектива, в полной мере завершить работу не удалось. Созданный в 2011 г. ускоритель до настоящего времени не вышел на клинические испытания и с точки зрения современной аппаратуры устарел.

Онкологические клиники, пользуясь государственной поддержкой, закупили в 2008—2010 гг. ограниченное число оборудования производства компаний Varian (США) и Elekta

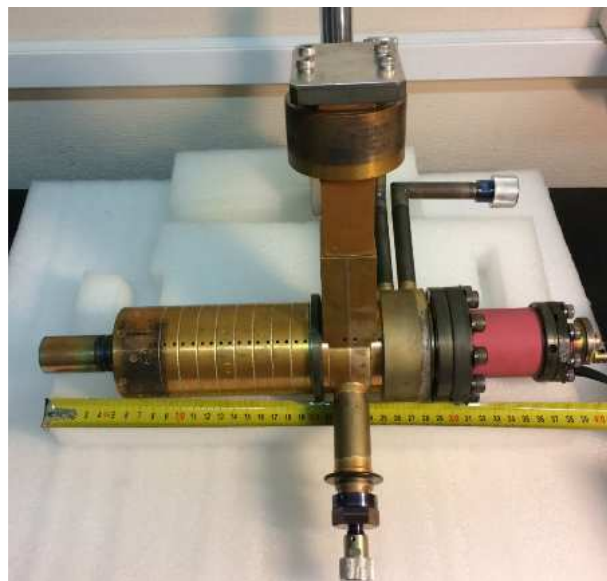
(Швеция). Это оборудование по производительности может обеспечить лечение примерно 60% нуждающихся в нем пациентов [1]. Кроме того, дорогостоящее сервисное обслуживание ограничивает его использование. Дефицит ускорителей электронов энергией 6 МэВ на ближайшие 5 лет оценивается 250—300 экземплярами. В их число входят и подлежащие замене.

Учитывая большой спрос, в Госкорпорации «Росатом» было принято решение о создании для дистанционной лучевой терапии ускорителя электронов энергией 6 МэВ, получившего рабочее название КЛТ-6. Такой выбор энергии был обусловлен тем, что примерно в 70% случаев используются пучки тормозного излучения номинальной энергией 6 МэВ. Для разработки проекта была создана кооперация организаций во главе с АО «НИИТФА». В нее вошло несколько предприятий, среди которых ООО «ЛЭУ МГУ» и НИЯУ МИФИ. Для учета практического опыта радиотерапевтов в кооперацию был приглашен Национальный медицинский исследовательский центр радиологии. Целью проекта является разработка комплекса, макси-

мально соответствующего потребностям отделений лучевой терапии клиник и обладающего всеми возможностями передовых медицинских ускорителей мирового класса. Особое внимание в проекте уделяется приемлемой стоимости и повышенной ремонтопригодности. На базе филиала НМИЦР в г. Обнинске, где пройдут клинические испытания КЛТ-6, создается ремонтно-сервисная служба.

Состав комплекса. На базе ускорителя электронов энергией 6 МэВ создается радиотерапевтический комплекс для реализации современных методик дистанционной лучевой терапии. Генерируемый им пучок тормозного излучения можно будет использовать как с выравнивающим фильтром — при этом максимальная мощность дозы излучения составит 600 сГр/мин, так и без него — с увеличением мощности дозы до 1000 сГр/мин. В стандартной конфигурации КЛТ-6 оснащается компактным ускорителем 5-сантиметрового диапазона длины волны и системой компьютерной томографии в рентгеновском коническом пучке [2—4]. Базовая комплектация позволит использовать следующие методики лучевой терапии: 3-мерную конформную, с модуляцией интенсивности пучка, ротационную с объемной модуляцией интенсивности пучка, лучевую с применением средств визуализации для контроля положения пациента. Опционально будут доступны такие методики реализации, как лучевая терапия с синхронизацией по дыханию и адаптивная лучевая терапия.

Особенностями КЛТ-6 являются компактный ускоритель электронов 5-сантиметрового диапазона длины волны, твердотельный модулятор, визуализация в пучке тормозного излучения низкой номинальной энергией 2,5 МэВ, пучок тормозного излучения без выравнивающего фильтра, конусно-лучевая компьютерная томография, многолепестковый коллиматор, адаптивная лучевая терапия, терапевтический стол с шестью степенями свободы. Компактная и легкая конструкция ускорителя, разработанная в ООО «ЛЭУ МГУ», и ее многолучевой клистрон позволят значительно уменьшить массу и габариты гантри (рис. 1, 2). Отпавшая ускоряющая структура длиной 20 см располагается вертикально, не требует магнитооптической системы и дополнительной системы откачки, что увеличивает стабильность поля облучения, уменьшает размеры и массу ускорителя, а также упрощает



Р и с. 1. Ускоряющая структура 5-сантиметрового диапазона длины волны, разработанная для КЛТ-6



Р и с. 2. Компактный многолучевой клистрон

эксплуатацию. Питание ускоряющей структуры осуществляется от многолучевого прибора КИУ-271 производства АО НПП «Торий». Следствием компактности конструкции является увеличение свободного пространства между головкой гантри и изоцентром — клиренса ускорителя, что влечет за собой более комфортное для пациента размещение во время лечения, а также более свободный доступ медицинского персонала к пациенту во время его позиционирования на терапевтическом столе КЛТ-6 (см. таблицу). Использование современного твердотельного модулятора для ускоряющей системы позволит генерировать пучки с быстро изменяющейся мощностью дозы излучения, что сделает возможной оптимальную реализацию планов лечения с модуляцией интенсивности.

В разрабатываемом ускорителе энергия пучка электронов может быть уменьшена до

Основные параметры КЛТ-6 в сравнении с линейными ускорителями Varian (США) и Elekta (Швеция) с номинальной энергией пучка тормозного излучения 6 МэВ в базовой комплектации

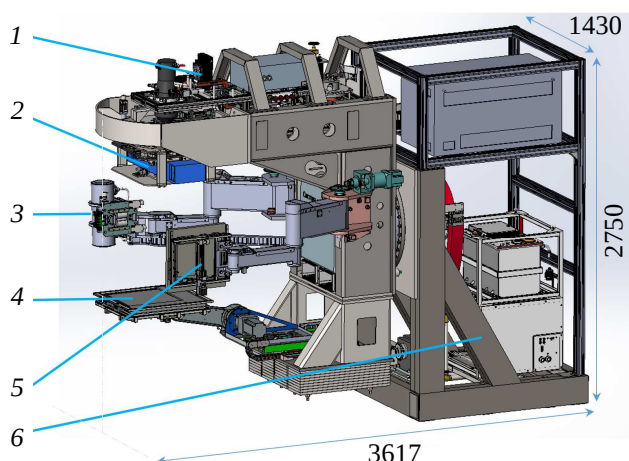
Параметр	UNIQUE Performance Edition (Varian) [5]	Compact (Elekta) [6, 7]	КЛТ-6 (АО «НИИТФА»)
Год выпуска	2012 г.	2008 г.	2021 г.
Источник питания	Магнетрон	Магнетрон	Клистрон
Максимальная мощность дозы излучения, сГр/мин	600	350	600
Пучок без выравнивающего фильтра	Нет	Нет	Есть, мощность дозы 1000 сГр/мин
Многолепестковый коллиматор	120 лепестков (60 пар)	Нет	120 лепестков (60 пар)
Детектор тормозного излучения:	aS1000 (изготовитель: Varian Medical Systems, США)	Нет	IVS (изготовитель: LinaTech, США—Китай)
разрешение матрицы детектора, пиксель	1024×768	Нет	2688×2688
размер активной области детектора, см	40×30	Нет	41×41
Реализуемые методики лучевой терапии:			
3-мерная конформная	Да	Да	Да
с модуляцией интенсивности пучка	Да	Опция	Да
ротационная с объемной модуляцией интенсивности пучка	Да	Нет	Да
Конусно-лучевая компьютерная томография в пучке рентгеновского излучения:	Нет	Нет	Да
разрешение матрицы детектора, пиксель	Нет	Нет	3072×3072
поле обзора, см	Нет	Нет	52
Клиренс, см	43	45	>49

2,5 МэВ. Соответствующий пучок тормозного излучения будет использован для получения более контрастных, чем в терапевтическом пучке, изображений пациента для контроля его положения на столе ускорителя во время сеанса лучевой терапии. В перспективе планируется реализация конусно-лучевой компьютерной томографии в пучке тормозного излучения. Характеристики используемого детектора являются одними из лучших в настоящее время (см. таблицу). Пучки без выравнивающих фильтров часто используют при реализации методик лучевой терапии с модуляцией интенсивности пучка и синхронизацией по дыханию. Высокая мощность дозы, достигаемая при использовании таких пучков, уменьшает время лечения пациента в среднем на 10—30%.

Стандартная конфигурация КЛТ-6 будет включать в себя систему конусно-лучевой компьютерной томографии в рентгеновском пучке и соответственно поддерживать все известные методики рентгеновской визуализации для точного позиционирования пациента на терапевтическом столе.

Используемый коллиматор со 120 лепестками (60 пар лепестков) предоставляет возможность формирования полей сложных форм максимальным размером до 40×40 см. Ширина центральных лепестков составляет 0,5 см, периферических — 1 см. Значимый для реализации методик лучевой терапии с модуляцией интенсивности параметр «выбег лепестков за центральную ось пучка» составляет 20 см. Опционально КЛТ-6 будет оснащаться автоматической системой адаптивной лучевой терапии, позволяющей оперативно отслеживать изменение размера облучаемой мишени, а также близко расположенных критических органов и корректировать план лечения в строгом соответствии с текущим состоянием пациента. Основой станет использование алгоритмов деформируемой регистрации как контуров органов риска и мишеней, так и наборов срезов компьютерной томографии пациента, получаемых с помощью конусно-лучевого томографа.

В стандартной конфигурации КЛТ-6 будет поставляться традиционный терапевтический стол с четырьмя степенями свободы (последовательное перемещение вдоль осей X, Y, Z и



Р и с. 3. Содержание внутренних узлов КЛТ-6: 1 — гантри с ускорителем 5-сантиметрового диапазона длины волн; 2 — многолепестковый коллиматор; 3, 4 — рентгеновская трубка и детектор рентгеновского излучения системы конической лучевой компьютерной томографии; 5 — детектор тормозного излучения; 6 — станина с твердотельным модулятором

изоцентрическое вращение). Для более точного размещения пациента число степеней свободы стола может быть увеличено до шести (включая продольный наклон стола «pitch» и поворот вокруг продольной оси тела пациента «roll»).

КЛТ-6 будет иметь традиционный для медицинского линейного ускорителя вид (рис. 3). Компактный ускоритель размещается в гантри коаксиально (поворотных магнитов нет). После двух пар сплошных шторок пучок проходит через специально разработанную систему мониторинга дозы и многолепестковый коллиматор. Система мониторинга дозы представляет собой ионизационную камеру, которая контролирует дозу, отпускаемую пациенту, а также мощность дозы и такие параметры пучка излучения, как однородность и симметричность. При выходе какого-либо параметра за допустимые пределы она блокирует пучок излучения и прерывает сеанс лучевой терапии. По бокам гантри на приводах размещаются рентгеновские трубка и детектор системы конусно-лучевой компьютерной томографии, снизу — детектор тормозного излучения.

В настоящее время в НПО «ГКМП» (г. Брянск) изготавливается опытный образец опорно-поворотной системы КЛТ-6. Внешний вид комплекса создается итальянскими дизайнерами. Разрабатывается и изготавливается многолепестковый коллиматор. Проектируется специализированное программное обеспечение

для управления КЛТ-6. Проводятся оценка и выбор системы планирования и онкологической информационной системы, обязательных компонентов современного радиотерапевтического комплекса. В конце 2019 г. ожидается сборка экспериментального образца КЛТ-6. В планах на 2020 г. — его доработка и технические испытания, на 2021 г. — клинические испытания и серийное производство, которое должно удовлетворить спрос отечественного рынка на подобные системы для дистанционной лучевой терапии и, следовательно, увеличить доступность и качество лечения онкологических пациентов.

Работа подготовлена в рамках выполнения соглашения между Министерством образования и науки России и АО «НИИТФА» о предоставлении субсидии № 14.582.21.0011 от 03.10.17 г. «Создание и передача на клинические испытания образца импортозамещающего комплекса лучевой терапии на базе инновационного оборудования (6 МэВ ускорителя и конусно-лучевого томографа)». Уникальный идентификатор соглашения RFMEFI58217X0011.

Индустриальным партнером проекта выступило АО «Русатом Хэлскеа», интегратор Госкорпорации «Росатом» в области радиационных технологий в медицине.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хмелевский Е.В., Каприн А.Д. Состояние радиотерапевтической службы России: сравнительный анализ и перспективы развития. — Онкология. Журнал им. П.А. Герцена, 2017, т. 6, вып. 4, с. 38—41. <https://doi.org/10.17116/onkolog20176438-41>.
2. Ovchinnikova L.Yu., Shvedunov V.I. Design of C-band electron linear accelerator for a complex of radiation therapy. — In: 29th Linear Accelerator Conf. LINAC18. TUPO097 China, Beijing, <http://linac2018.vrws.de/papers/tupo097.pdf>.
3. Yurov D.S., Ovchinnikova L.Yu., Alimov A.S. e.a. Beam parameters measurement of C-band 6 MeV linear electron accelerator. — Ibid., <http://linac2018.vrws.de/papers/mopo061.pdf>.
4. Ermakov A.N., Alimov A.S., Ovchinnikova L.Yu. e.a. Linacs for industry, cargo inspection and medicine designed by Moscow University. — Ibid., <http://linac2018.vrws.de/papers/mopo060.pdf>.
5. UNIQUE™. The Complete Radiation Oncology Solution. Specifications, VEO OS 1050I, Varian Medical Systems International AG, Switzerland, Cham, 2016.
6. Elekta Compact™. Product Data, Art. № 4513 371 0755, Elekta AB, Sweden, Stockholm.
7. Elekta Compact™. Site Planning Guide, № 1005521 03, Elekta AB, Sweden, Stockholm, 11/2010.

Поступила в Редакцию 26.10.18