

УСТАНОВКА ДЛЯ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ОБЛАСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ПОГЛОЩЕННЫХ ДОЗ В ФАНТОМЕ НА ПУЧКЕ ЭЛЕКТРОНОВ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ БИОЛОГИЧЕСКИХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

А.В. Гринкевич¹, В.В. Сиксин²

¹ ООО "ЭВС", Санкт-Петербург

² Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва

Разработана и испытана на пучке электронов ускорителя "Пахра" установка с высокочувствительной телевизионной камерой для визуализации области формирования поглощенных доз в фантоме с водой. Установка состоит из водного фантома и ТВ камеры с аппаратурой съема информации с нее. Экспериментально определены геометрическая форма и размеры области свечения в фантоме при импульсном облучении фантома пучком электронов с энергией 7 МэВ, проведены модельные расчеты для определения поглощенных доз при поглощении электронов в воде.

Ключевые слова: электронные ускорители, водный фантом, адаптивная телевизионная камера, глубинное дозное распределение, установка для визуализации

Введение

Впервые применена и испытана на пучке электронов ускорителя "Пахра" – установка с тканеэквивалентным водонаполненным фантомом с водой и высокочувствительной телевизионной камерой, в дальнейшем "установка". Использовался инжектор ускорителя "Пахра" ОФВЭ института ФИАН г. Москва. Ускоритель настраивался на энергию 7 МэВ в импульсном режиме, с длительностью сброса 4 нс и частотой посылок 50 Гц. Ускоритель "Пахра" используется для физических экспериментов и прикладных работ. Созданная установка является универсальным измерителем, на основе фантома, облучаемого разными видами излучений и предназначенного для определения геометрических размеров области энерговыделения пучка в фантоме и дальнейшей оценки формирования поглощенных доз в тканеэквивалентных фантомах.

В настоящее время в радиологии для регистрации поглощенных доз в фантомах наиболее часто применяются ионизационные камеры и метод пленочной дозиметрии [1]. В основе метода пленочной дозиметрии лежат химические процессы, протекающие в активном слое пленки под действием ионизирующего излучения, которые приводят к изменению оптических свойств пленки. Для определения величины поглощенной дозы, полученные фотографии сопоставляются с результатами калибровки на пучке известного качества. В работе [2] приводится распределение изодоз в воде и на фотопленке при разных энергиях электронного пучка (рис. 106) с применением водонаполненного фантома и пучка электронов с энергиями 5 и 15 МэВ.

Недостатком ионизационной камеры являются очень низкие токи, для регистрации ко-

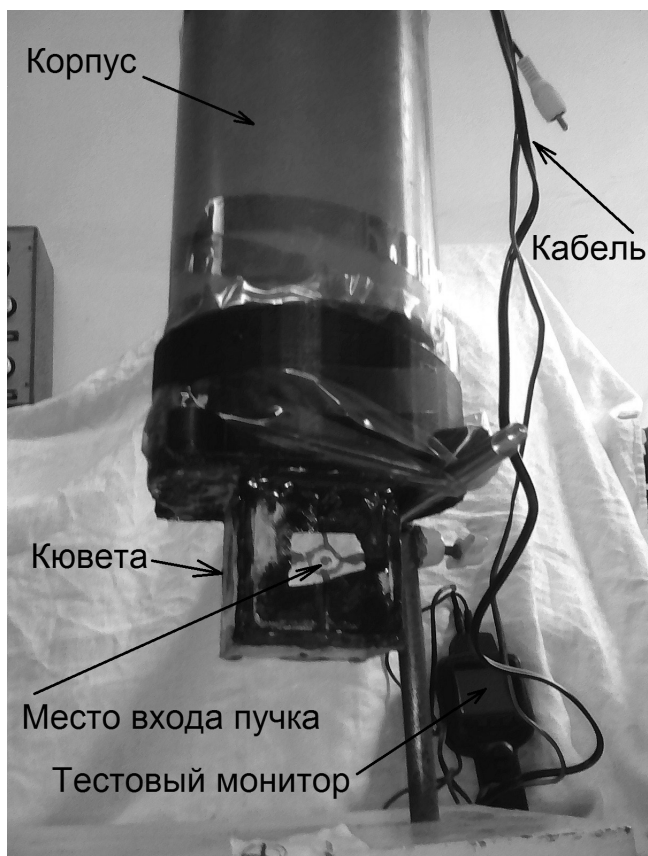


Рис. 1. Нижняя часть установки

торых требуется применение сложных и дорогостоящих зарядочувствительных усилителей.

Недостатками пленочного метода являются необходимость влажной химической обработки и высокая чувствительность к температуре и влажности, а также уменьшение оптической плотности при очень высоких дозах.

Целью настоящей работы является создание детектора телевизионного типа для визуализации зоны энергвыделения в реальном режиме времени и ее видеозаписи при прохождении пучка электронов через водный фантом.

Описание установки

Установка включает телевизионную камеру (ТВК) и тестовый монитор с встроенным видеорегистратором, осуществляющим запись изображения в формате 320×240 пикселей с частотой 25 кадров в секунду.

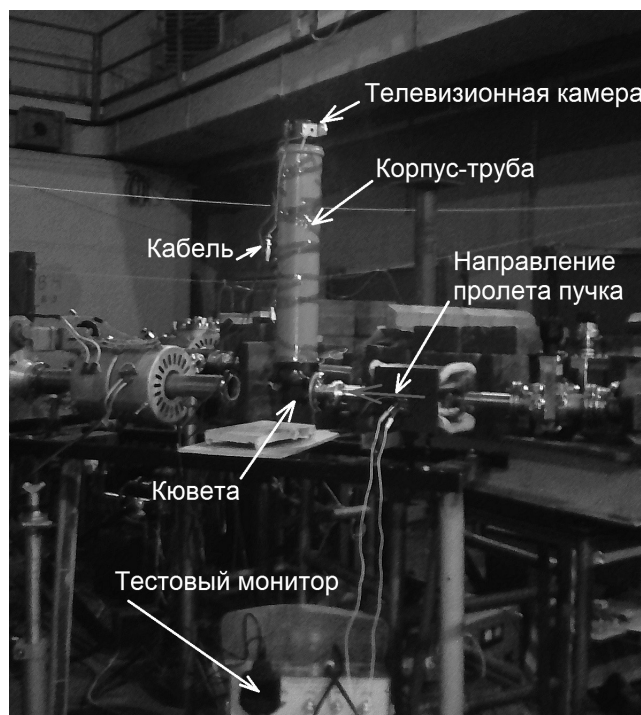


Рис. 2. Установка на канале

На рис. 1 показана нижняя часть установки, которая представляет собой кювету с размером внутренней части $55 \times 55 \times 55$ мм, которая затем переходит в трубу.

Все детали узла кюветы изготовлены из непрозрачной черной пластмассы. В кювету залита дистиллированная вода, верхний ее край открыт для ТВК, которая располагается на расстоянии 65 см выше верхнего слоя воды. Применен объектив с фокусным расстоянием 25 мм, сфокусированный на середину кюветы. Расстояние 65 см обеспечивает предохранение электронных узлов ТВК от воздействия пучка электронов высокой энергии.

В верхней части трубы закреплена ТВК. Установка была надежно защищена светозащитным кожухом от постороннего света.

На рис. 2 показана установка, смонтированная на канале ускорителя с энергией 7 МэВ.

Видна кювета (фантом), расстояние от входного окна которой до ионопровода составляет 3,5 см. На фантом за один импульс поступает $7,5 \times 10^{11}$ электронов. Поперечный размер пучка при входе во входное окно кюветы имеет диаметр 8 мм. Пучок попадает по высоте в центр кюветы с небольшим смещением в сторону к одной из боковых стенок кюветы.

Процессы, происходящие в фантоме при прохождении электронов

Механизм преобразования энергии падающего пучка электронов в воде изучен, и мы остановимся только на двух процессах, дающих отклик в ТВК нашей установки. Быстрые электроны, вследствие их многократного рассеяния теряют энергию, не выходя за границу фантома. Область пространственного распределения свечения, которое регистрирует ТВК, имеет форму «светящегося эллипса».

Можно предположить, что механизм свечения вызван электромагнитным излучением, которое называется тормозным. В работе [3] указано, что тормозное излучение имеет непрерывный спектр и почти круговую диаграмму направленности. ТВК имеет возможность регистрировать тормозное излучение в оптическом спектральном диапазоне чувствительности фотоприемника.

Также возможно, что ТВК частично видит черенковское свечение в зоне «области свечения» [4].

Описание телевизионной камеры

В соответствии с требованиями эксперимента требовалась ТВК, обеспечивающая регистрацию слабого свечения в видимом и ближнем ИК диапазоне спектра с усилением, эквивалентным электронно-оптическим преобразователям (ЭОП) не хуже второго поколения, и обладающая адаптивными возможностями в автоматическом режиме без вмешательства оператора. Это необходимо для обеспечения гарантированного результата в радиационно опасной зоне ускорителя.

Среди многочисленной продукции зарубежных фирм телевизионных камер такого уровня нет в каталогах и нет в разработках.

Среди отечественных разработок условиям эксперимента могла удовлетворить одна модель ТВК – типа VNC-702, разработанная для спецприменений предприятием ООО «ЭВС» (г. Санкт-Петербург), и обладающая высокой чувствительностью – до 0,00003 лк. Для определения возможности соответствия ТВК VNC-702 условиям экспериментального обнаружения сверхслабого свечения был проведен предварительный анализ, который показал следующее.

В приборах ночного видения на основе ЭОП при уменьшении освещенности происхо-

дит уменьшение разрешающей способности, которое контролируется в условиях оптической лаборатории оптико-механических предприятий. Сравнение телевизионных приборов и приборов на основе ЭОП затруднено разными методиками метрологических измерений. Рассмотрим результаты измерений угловой разрешающей способности прибора ночного видения НЗТ-1, спроектированного на базе ЭОП типа ЭП-33 первого поколения [5].

Для дальнейшего сравнения произведем пересчет разрешающей способности прибора в разрешающую способность фотокатода [6]:

$$N = 1/(\alpha \cdot f), \quad (1)$$

где N – разрешающая сила в линиях на 1 мм фотокатода; f – фокусное расстояние объектива в мм; α – угловая разрешающая сила в радианах.

Также произведем пересчет освещенности на мире (испытательной пластинке) в освещенность на фотокатоде [6]:

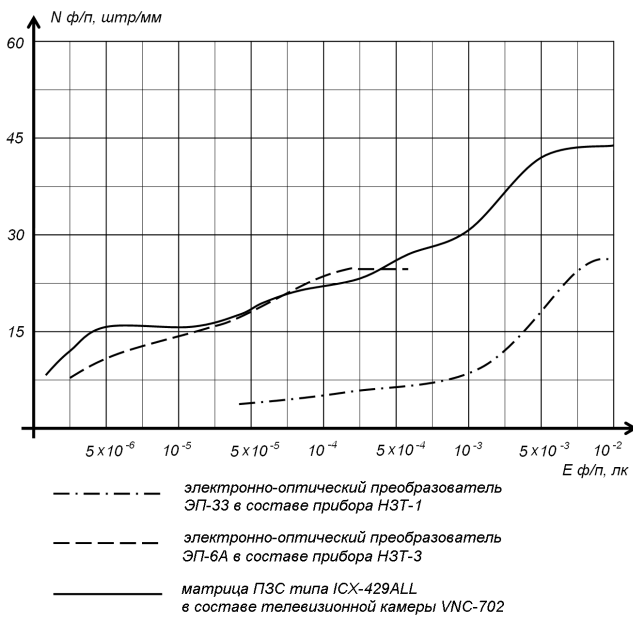
$$E_{\phi} = \tau \cdot \rho \cdot E_m \cdot A^2 / 4, \quad (2)$$

где τ – коэффициент пропускания объектива, принят 0,8; ρ – коэффициент отражения поверхности мира, принят 0,8; E_m – освещенность мира, лк; A – относительное отверстие объектива.

Аналогичным образом рассмотрим результаты измерений прибора НЗТ-3 2-го поколения, в котором используется одна из лучших конструкций двухкамерного ЭОП с мультищелочным фотокатодом [7]. Этот ЭОП был разработан для применения в спецтехнике, а для приборов ночного видения широкого применения имеет наименование ЭП-6-А.

Сравнение произведем по результатам измерений разрешающей способности телевизионной камеры VNC-702, полученным А.Н. Куликовым в телевизионной лаборатории ЗАО «ЭВС» при следующих условиях.

В камеру был установлен объектив Avenir с фокусным расстоянием $f=6$ мм и с относительным отверстием $A=1:2$. Подсветка тестовой таблицы (миры) для проверки горизонтального разрешения производилась лампой накаливания 100 Вт, измерения освещенности на тестовой таблице производились люксметром Ю166 с фотоэлементом Ф55С, тестовая таблица устанавливалась на расстоянии 3×5 м. Для ослабления освещенности использовался набор нейтральных фильтров НС. Для измерений использовалась плата ввода телевизионного сигнала в компьютер производства ЗАО



Значения разрешающей способности ЭОП и ПЗС при изменении освещенности на фотокатодах ЭОП и на фоточувствительной площадке ПЗС

Рис. 3. График чувствительности

“ЭВС” типа “Контраст-5”, а также специализированное измерительное ПО OSC-16.

Рассматривались результаты измерений, полученные при применении тестовой таблицы в виде белых тестов и мир на черном фоне. Пересчет освещенности на мире в освещенность на фотоприемнике производился по формуле (2). Пересчет телевизионной разрешающей способности в линии на 1 мм на фотоприемнике производился по формуле [6]:

$$N = Z / (2 \cdot H), \quad (3)$$

где Z – измеренная горизонтальная разрешающая способность в телевизионных линиях; H – размер фоточувствительной части ПЗС-матрицы в горизонтальном направлении (6,4 мм).

Разрешение оценивали при измерении параметров стоп-кадра, под разрешением понималось число телевизионных линий, глубина модуляции на которых не менее 10 %.

Полученные зависимости (рис. 3) показывают возможности предельной чувствительности телевизионной камеры VNC-702, разработанной ЗАО “ЭВС”, г. Санкт-Петербург, с использованием ПЗС-фотоприемника типа ICX-429ALL.

Особенностями ПЗС-фотоприемников являются сам принцип накопления сигнала, практическое отсутствие инерционности и воз-

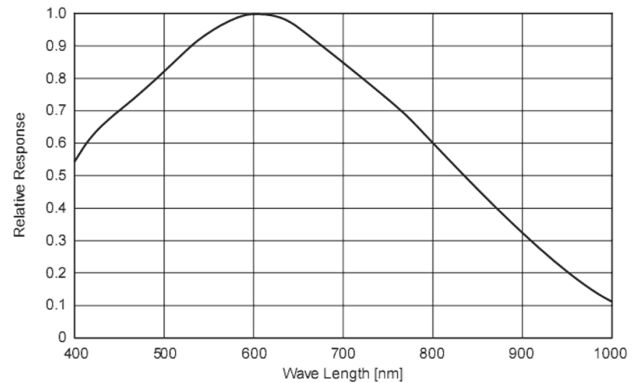


Рис. 4. Спектральная чувствительность фотоприемника ICX-659AL

можность регистрации сверхкоротких импульсов длительностью в единицы нс [8].

После появления нового поколения ПЗС-матриц, характерным представителем которого является ICX-659AL, была разработана модификация камеры VNC-702, которая в бескорпусном варианте получила наименование VNA-753-НЗ и запущена в серийное производство на предприятии ЗАО “ЭВС”, г. Санкт-Петербург. Этот вариант камеры был применен в настоящем эксперименте.

Особенностью матрицы нового поколения ICX-659AL является более высокая (более чем в 1,5 раза) чувствительность и уменьшенный уровень шумов. Спектральная характеристика ПЗС фотоприемника типа ICX-659AL показана на рис. 4.

В ТВК VNC-702 и VNA-753-НЗ используется 2 вида режимов повышения чувствительности, в которых происходит накопление сигнала [9].

Первый режим заключается в автоматическом обмене разрешающей способности камеры на чувствительность при малых уровнях освещенности. Максимальное число сложений, равное 12 (12 пикселей объединяется в 1), приводит к пропорциональному росту чувствительности в 12 раз. Второй режим заключается в увеличении времени накопления телевизионной камеры до 16 телевизионных кадров (1 такой суммарный кадр будет иметь длительность 0,32 с) при уменьшении освещенности. Суммарное увеличение чувствительности при одновременном использовании обоих режимов достигает 100 раз и автоматически регулируется программой встроенного в ТВК микропроцессора в зависимости от изменения яркости наблюдаемого объекта.

Еще одной особенностью нового поколения ПЗС типа ICX-659AL являются чрезвычайно малые тепловые шумы, токи утечки и шумы, обусловленные термоэлектронной эмиссией. При разработке ТВК VNA-753-НЗ практически было установлено, что для ПЗС типа ICX-659AL влияние этих шумов становится заметным только при временах накопления более нескольких секунд. В этом случае дает эффект охлаждения ПЗС-фотоприемника. В нашем случае время накопления ограничено длительностью 0,32 с, поэтому охлаждения фотоприемника в ТВК VNA-753-НЗ не потребовалось. Но такой малокадровый режим с длительностью суммарного кадра 0,32 с потребовал введения в состав ТВК преобразователя телевизионного стандарта [9].

Преобразователь телевизионного стандарта содержит запоминающее устройство, которое осуществляет непрерывную выдачу накопленного кадра на экран монитора (видеорегистратора) в стандартном телевизионном режиме, т.е. в течение 0,32 с (времени накопления каждого последующего суммарного кадра) происходит непрерывная выдача предыдущего кадра со стандартной частотой ТВ сигнала. Преобразование малокадрового режима в стандартный телевизионный позволяет вести запись изображения и осуществлять наблюдение на экране тестового монитора со стандартной частотой кадров 25 Гц, при этом обновление информации будет происходить с частотой 3 Гц. Такая искусственно введенная инерционность позволяет визуализировать короткие по длительности накопленные импульсы, что требуется при проведении эксперимента.

В условиях эксперимента ограничение постороннего света вводит камеру VNA-753-НЗ в режим максимальной чувствительности, что хорошо заметно по шумам, проявляющимся в виде белых точек, хаотично расположенных и перемещающихся от кадра к кадру (рис. 5).

Высокая паспортная чувствительность камеры (0,00003 лк) при максимальной адаптации к темноте обеспечивает стабильный "темновой" кадр. При этом выявлено, что дополнительный чехол из черной материи все же пропускает настолько малую часть внешнего освещения, что на "темновом" кадре становится видна слабо просматриваемая кювета.

При таком малом освещении адаптивный механизм телевизионной камеры VNA-753-НЗ "держит" ее в режиме максимальной чувствительности – объединение 12 пикселей в 1 и сло-

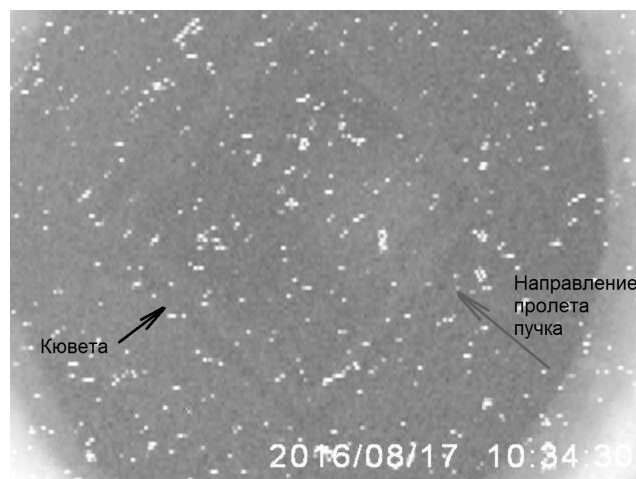


Рис. 5. "Темновой" кадр

жение 16 кадров длительностью по 20 мс в один суммарный кадр, т.е. здесь мы регистрируем изображение, эквивалентное времени накопления 0,32 с.

При облучении пучком электронов появляется свечение в кювете с водой и начинает работать автоматический адаптивный механизм камеры, анализирующий прошедший кадр и изменяющий при необходимости количество складываемых кадров в каждом последующем суммарном кадре. Ориентировочное время отработки программы микропроцессора ТВК лежит в диапазоне от 2 до 5 с. Параметры пучка не изменяются в течение 10 с, обеспечивая стабильность яркости области свечения в кювете с водой. Это позволяет адаптивному механизму ТВК VNA-753-НЗ войти в установившийся режим и регистрировать устойчивое изображение после 5-й секунды цикла. Время автоматической отработки механизма адаптации достаточно точно определяется экспериментально и по анализу полученных кадров за стабильное изображение можно принять изображение на 7-й секунде цикла.

Анализ экспериментальных данных

По снимкам с ТВК анализируется точное положение и размеры области свечения в районе области энерговыделения.

Кювета (фантом) разбивается на координатную сетку ("бины"), привязанную к системе координат, которыми являются границы квадрата стенок кюветы.

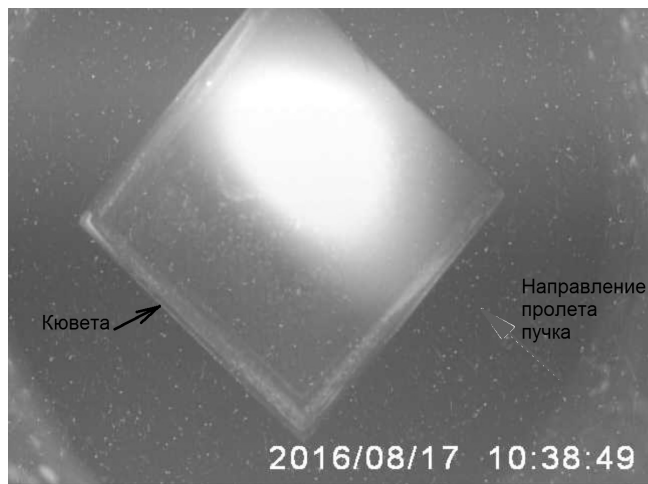


Рис. 6. 7-я секунда цикла. Стабильное изображение

Область свечения привязывается к этой системе координат для дальнейшего анализа по определению области энерговыделения.

Ускоритель включался на 10 с, а затем выключался на 20 с и такие сбросы повторялись в течение всего сеанса. Была установлена повторяемость результата приведенного ниже.

На секундах с 5-й по 9-ю кадры стабильны и для дальнейшего анализа принят кадр 7-й секунды цикла (рис. 6).

На рис. 5 и 6 стрелкой показано направление пролета и положение оси пучка электронов.

После завершения цикла микропроцессор ТВК снова вводит ее в режим максимальной чувствительности, и мы снова начинаем видеть “темновой” кадр – рис. 5.

Все последующие циклы регистрировались практически одинаковыми кадрами видеорегистратора.

Оценка поглощенной дозы в фантоме

Также для эксперимента был проведен теоретический расчет поглощенной дозы, в который вводились интенсивность пучка электронов за импульс, частота посылок, размер пучка на входе в фантом, размер фантома, ориентировка пучка по центру фантома. Поперечное распределение частиц на входе фантома считалось равномерным.

Теоретические расчеты показали, что энерговыделение проявляется в виде сферы в

центре фантома радиусом 7,5 мм, а за 500 импульсов выделилась доза, равная $(2,29 \pm 0,03) \times 10^4$ Гр.

Измеренные геометрические размеры области свечения, зафиксированные установкой на стабильном кадре (рис. 6) имеют размеры $\sim 36 \times 24$ мм.

Компьютерное моделирование взаимодействия электронного пучка с фантомом было проведено с использованием пакета программ [10]. В частности, оценка поглощенной дозы была получена численным экспериментом по программе msp4. Расчет был проведен А.Е. Чернуха из Медицинского радиологического научного центра, г. Обнинск.

Снижение интенсивности пучка ускорителя возможно регулировкой режима работы ускорителя, что в совокупности с малыми размерами формирования поглощенной дозы позволяет использовать ускоритель “Пахра” для биологических экспериментов.

Применение детектора телевизионного типа

Впервые разработанный детектор телевизионного типа предназначен для применения в биологических экспериментах и перед терапевтическими сеансами для проверки области энерговыделения и верификации дозных полей в тканеэквивалентных фантомах.

Авторы выражают благодарность А.И. Львову за поддержку работы, Г.Г. Субботину за настройку ускорителя в нужный для эксперимента режим, а также А.В. Антипову за плодотворные творческие дискуссии.

Список литературы

1. Марков Н.В. Дозиметрия импульсных пучков тяжелых ионов для радиобиологических исследований на ускорительном комплексе ИТЭФ-ТВН, Дисс. на соискание ученой степени к.ф.-м.н. Национальный исследовательский центр “Курчатовский Институт”, Москва, 2014.
2. Москалев В.А., Чахлов В.Л. Бетатроны. – Изд-во Томского политехнического университета. 2009.

3. Абрамов А.И., Казанский Ю.А., Матусевич Е.С. Основы экспериментальных методов ядерной физики. – М.: Атомиздат, 1977.
4. Зрелов В.П. Излучение Вавилова–Черенкова и его применение в физике высоких энергий. Т.1, Т.2. – М.: Атомиздат, 1968.
5. Медведев А.В., Касауров Б.С., Гринкевич А.В., Князева С.Н. Малогабаритная зрительная трубка для низких уровней освещенности // Оптико-механическая промышленность. 1989. № 9. С. 28–29.
6. Турыгин И.А. Прикладная оптика. – М.: Машиностроение. 1966. С. 8, 48, 171.
7. Медведев А.В., Гринкевич А.В., Гундяк М.И., Никошин В.В. Зрительная труба ночного видения НЗТ-3 // Оптический журнал. 1993. № 4. С. 51–53.
8. Пресс Ф.П. Фоточувствительные приборы с зарядовой связью. – М.: Радио и связь. 1991. 264 с.
9. Хромов Л.И., Лебедев Н.В., Цыцулин А.К., Куликов А.Н. Твердотельное телевидение. Телевизионные системы с переменными параметрами на ПЗС и микропроцессорах. – М.: Радио и связь. 1986. 183 с.
10. Briesmelster J.F. MNCP-A general Monte Carlo N-particle transport code. Version 4C. Report LA-13709-M. Los Alamos National Laboratory. Los Alamos. 2000.

APPARATUS FOR THE IMAGING OF THE ABSORBED DOSE FORMATION REGION IN PHANTOM AT THE ELECTRON BEAM FOR BIOLOGIST EXPERIMENTS

A.V. Grinkevich¹, V.V. Siksin²

¹ LLC “EVS” St. Petersburg, Russia

² P.N. Lebedev Physical Institute of RAS, Moscow, Russia

The unit with the very sensible adaptable television camera for high dose region visualization in water phantom was developed. Experiments in pulsed 7 MeV electron beam and model calculations were provided.

Key words: electron accelerators, water phantom, adaptable television camera, depth dose distribution, image device

E-mail: antktech@yandex.ru