

ISSN 2410-4914



А.В.ГРИНКЕВИЧ, В.В.СИКСИН



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

Препринты ФИАН им. П. Н. Лебедева

ISSN 2410-4914

Главный редактор В. И. Ритус, *зам. главного редактора* А. А. Гиппиус, *научный секретарь* С. А. Богачев, *ответственный секретарь* Л. В. Селезнев

Редакционная коллегия: В.С.Бескин, А.А.Горбацевич, О.Д. Далькаров, Е.И. Демихов, И.Г. Зубарев, К.П. Зыбин, А.А.Ионин, Н.Н.Колачевский, Е.Р.Корешева, С.Ф. Лихачев, А.С. Насибов, И.Д. Новиков, В.Н. Очкин, Н.Г.Полухина, В.С. Лебедев, Н.Н.Сибельдин, Д.Р.Хохлов, С.А. Чайковский

Информация

Препринты ФИАН им. П. Н. Лебедева издаются с 1964 г.

Издатель: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им. П. Н. Лебедева Российской академии наук (ФИАН)

Адрес редакции: Россия, 119991 Москва, Ленинский просп., 53, ФИАН Тел.: +7 (499) 132-6137, +7 (499) 783-3640; E-mail: *preprins@sci.lebedev.ru, irinakh@sci.lebedev.ru*

Страница сборника «Препринты ФИАН им. П. Н. Лебедева» в интернете: *http://preprints.lebedev.ru/*

© Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, 2016

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ИМ. П.Н. ЛЕБЕДЕВА

А.В. Гринкевич¹, В.В. Сиксин² ¹ООО"ЭВС" г. Санкт-Петербург, e-mail: lyu1455@yandex.ru ²Физический институт им. П.Н. Лебедева, РАН, г. Москва. E-mail:antktech@yandex.ru

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

<u>№</u> 8

Москва 2016

А.В. Гринкевич, В.В. Сиксин

Установка для визуализации области формирования поглощенных доз в фантоме с водой на пучке электронов для проведения биологических экспериментов

АННОТАЦИЯ

Разработана и испытана на пучке электронов ускорителя "Пахра" установка с высокочувствительной инфракрасной камерой для визуализации области формирования поглощенных доз в фантоме с водой. Установка состоит из тканеэквивалентного водного фантома и ИК камеры с аппаратурой съема информации. Экспериментально определены геометрическая форма и размеры области энерговыделения в фантоме при импульсном облучении фантома пучком электронов с энергией 7 МэВ, проведены модельные расчеты для определения поглощенных доз при поглощении электронов в воде. Показано преимущество нового метода по сравнению с методом ионизационной камеры.

A.V. Grinkevich, V.V. Siksin

Setup for visualization of the absorbed dose formation region in a phantom with water at the electron beam for biological experiments

ABSTRACT

A setup with a high-sensitive infrared camera for visualization of the absorbed dose formation region in a phantom with water was created and tested at the accelerator "Pakhra". The setup consist of from a tissue-equivalent water phantom and an infrared camera and a system of data collection. Geometric form and a size of the energy release region in the phantom under pulses of 7-MeV electrons have been determined experimentally. Model calculations have been done in order to determine absorbed doses for electron absorption in water. Advantage of the new method with respect to the method of ionization camera is demonstrated.

1. ВВЕДЕНИЕ

Впервые применена и испытана на пучке электронов ускорителя "Пахра" – установка с тканеэквивалентным фантомом с водой и высокочувствительной инфракрасной камерой в дальнейшем "установка". Использовался инжектор ускорителя "Пахра" ОФВЭ института ФИАН г. Москва. Ускоритель настраивался на энергию 7 МэВ в импульсном режиме, с длительность сброса 4 мкс и частотой посылок 50 гц. Ускоритель "Пахра" используется для физических экспериментов и прикладных работ. Созданная установка является универсальным измерителем, пригодным для визуализации фантомов облучаемых разными видами излучений и регистрирующей необходимое число параметров пучка в максимальном диапазоне энергий и амплитуд токов ускоренных частиц. В частности данная установка может применяться для регистрации пучков протонов и заряженных ионов, типа ионов углерода на биологических пучках.

Установка позволяет, также выполнять функции измерителя профилей пучка на современных ускорителях и для работы на биологическом пучке ускорителя протонов в ИФВЭ г. Протвино.

Технология ионизационных камер, применяемая повсеместно в радиологии, для определения поглощенных доз в фантоме с водой обладает рядом недостатком, которые отсутствую в предлагаемой установке.

К недостаткам в методике ионизационных камер относятся:

- наличие токов утечки - снижающих точность и вносящих ошибки;

-дополнительное вещество в колпачках стенок ионизационной камеры, которая погружена в фантом с водой – искажает точную пространственную картину координатного распределения энерговыделения в фантоме с водой, которое мы в дальнейшем будем называть "Светящимся яйцом" или "Яйцом".

Впервые метод брахитерапии – т.е. имплантации радиоактивного, изотопа в тело человека, был применен около 100 лет назад и по прежнему активно применяется сейчас. Наша установка, по результатам проведенных измерений, близка к данному методу, так как зона "Светящегося яйца", где отпускается доза в тело человека, может быть небольшой и регулируется. Размер ее близок размеру перепелиного яйца, что позволяет подводить высокие дозы к ограниченному объему тела за предельно короткое время.

Целью настоящей работы являлось создание технологии и установки, которая позволит изучать поглощенные дозы в водном и тканеэквивалентном фантомах, формируемых высокодозными микроисточниками или ускорителями электронов, протонов и ионов.

2. ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Данная установка включает ИК камеру, обладающую чувствительностью, превышающей ЭОП поколения 2+, что позволяет в режиме реального времени реконструировать пространственные параметры процесса рекомбинации в прозрачных средах при поглощении и выделении всей энергии электронного пучка в фантоме.

На Рис. 1 показана нижняя часть установки, которая представляет собой кювету с размером внутренней части 55×55×55 мм, которая затем переходит в трубу.



Рис. 1. Нижняя часть установки.

Все детали узла кюветы, приведенные на этом фото, изготовлены из непрозрачной черной пластмассы (чтобы исключить фоновую засветку в видимой и инфракрасной области). В кювету залита вода, верхний ее край открыт и "смотрит" верхним слоем воды на камеру, которая располагается на 65 см выше верхнего слоя воды. Камера сфокусирована на середину кюветы и будет видеть любое слабое свечение, происходящее в кювете, как в видимой, так и в инфракрасной области до длины волна 1 мкм.

На Рис. 2 показана установка в сборе.



Рис. 2. Установка.

В верхней части трубы на детали из черной непрозрачной пластмассы закреплена инфракрасная телевизионная камера, оптическая ось которой проходит через центр квадрата кюветы (фантома) с размерами в горизонтальной области 55×55 мм. Во время сеанса, при прохождении пучка, края квадрата кюветы хорошо видны в инфракрасном диапазоне спектра за счет незначительного прохождения инфракрасного фона через трубу установки, изготовленную из полиэтиленовой пластмассы. Полиэтиленовая пластмасса трубы прозрачна для ИК диапазона. Во время прохождения пучка и проведения эксперимента вся установка закрывалась со всех сторон дополнительным чехлом из толстой черной материи из фетра. Чехол из фетра поглощал внешнюю засветку в инфракрасной области. На Рис. 3 показана установка, смонтированная на канале ускорителя с энергией 7 МэВ.



Рис. 3. Установка на канале.

Видна кювета (фантом), расстояние от входного окна которой до ионопровода составляет 3,5 см. На фантом за один импульс, равный 4 мкс, поступает $7,5 \times 10^{+11}$ электронов с частотой посылок 50 Гц. 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. Все энерговыделение и поглощенная доза "отпускаются" во внутреннюю часть кюветы, что хорошо видно из полученных снимков.

3. ПРОЦЕССЫ, ПРОИСХОДЯЩИЕ В ФАНТОМЕ ПРИ ПРОХОЖДЕНИИ ЭЛЕКТРОНОВ

Основная задача проверки установки на пучке состояла в изучении возможности использования установки в биологических экспериментах для определения поглощенных доз в тканеэквилентных фантомах, в том числе в водном фантоме.

Брахитерапия – метод, при котором радиоактивный источник имплантируется на короткое время в нужную точку тела человека, благодаря чему радиационной нагрузке подвергается небольшая область и окружающая нормальная ткань получает более низкую дозу облучения.

В результате эксперимента было установлено, что при пучке электронов с энергией 7 МэВ в центре фантома появляется так называемое "светящееся яйцо" с размерами, не превышающими 20 мм вдоль оси пучка и 15 мм диаметром, внутри которого выделяется вся энергия в воде и выделяется поглощенная доза. При поглощении энергии электронов происходят процессы поглощения, перераспределения и деградации поглощенной энергии.

В результате ионизации и возбуждения молекулы воды образуются ионы, возбужденные ионы, дельта-электроны, возбужденные состояния молекулы воды. Электронный пучок претерпевает упругие и неупругие взаимодействия. Электронные траектории рассчитываются с использованием метода Монте-Карло. При данной энергии 7 МэВ электрон теряет энергию в основном на ионизационные потери энергии (ионизационное торможение). В нашем эксперименте для грубой оценки всеми остальными процессами можно пренебречь. Свободные электроны, возвращаясь на возбужденную молекулу воды, испускают фотоны света – этот процесс называется радиационной фоторекомбинацией. Этот процесс свечения при фоторекомбинации видит ИК камера.

Т.е. наша установка может исследовать рекомбинационные процессы, происходящие в прозрачных для данной длины волны средах.

4. ОПИСАНИЕ ИНФРАКРАСНОЙ КАМЕРЫ

В соответствии с требованиями эксперимента требовалась телевизионная камера (твк), обеспечивающая регистрацию слабого свечения в видимом и ближнем ИК диапазоне спектра с усилением, эквивалентным электроннооптическим преобразователям второго и второго+ поколения, и обладающая адаптивными возможностями в автоматическом режиме без вмешательства оператора. Это необходимо для обеспечения гарантированного результата в опасной зоне ускорителя.

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

Среди отечественных разработок условиям эксперимента могла удовлетворить одна модель твк – типа VNA-753-H3, разработанная для спецприменений предприятием ООО "ЭВС" (г. Санкт-Петербург), и обладающая высокой чувствительностью – до 0,00003 лк. Для определения возможности соответствия твк VNA-753-H3 условиям экспериментального обнаружения сверхслабого свечения был проведен предварительный анализ, который показал следующее.

В приборах ночного видения, использующих ЭОП, при уменьшении освещенности происходит уменьшение разрешающей способности, которое контролируется в условиях оптической лаборатории оптико-механических предприятий. Сравнение телевизионных приборов и приборов, использующих ЭОП, в основном затруднено разными методиками метрологических измерений. Рассмотрим результаты измерений угловой разрешающей способности прибора ночного видения H3T-1, спроектированного на базе ЭОП типа ЭП-33 первого поколения [1].

Для дальнейшего сравнения произведем пересчет разрешающей способности прибора в разрешающую способность фотокатода [2]:

$$N = \frac{1}{\alpha \cdot f} , \tag{1}$$

где *N* – разрешающая сила в линиях на 1 мм фотокатода;

f-фокусное расстояние объектива в мм;

α – угловая разрешающая сила в рад.

Также произведем пересчет освещенности на мире в освещенность на фотокатоде [2]:

$$E_{\phi} = \tau \cdot \rho \cdot E_{\rm M} \cdot A^2 / 4 \tag{2}$$

где *т* – коэффициент пропускания объектива, принят 0,8;

 ρ – коэффициент отражения поверхности миры, принят 0,8;

*Е*_м – освещенность миры, лк;

А – относительное отверстие объектива.

Аналогичным образом рассмотрим результаты измерений прибора H3T-3 уровня 2-го поколения, в котором используется одна из лучших конструкций двухкамерного ЭОП с мультищелочным фотокатодом [3]. 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 (аналог VNA-753-H3), полученным Куликовым А.Н. 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. Для ослабления освещенности использовался набор нейтральных фильтров НС. Для измерений использовалась плата ввода телевизионного сигнала в компьютер производства ЗАО "ЭВС" типа "Контраст-5", а также специализированное измерительное ПО "OSC-16".

Рассматриваем 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 [2]:

$$N = \frac{z}{2 \cdot H} \tag{3}$$

где *Z* – измеренная горизонтальная разрешающая способность в телевизионных линиях;

H – размер фоточувствительной части ПЗС в горизонтальном направлении (6,4 мм).

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

Реально, при наблюдении "живого" изображения, за счет механизма временного интегрирования в человеческом глазе, разрешающая способность оказывается лучше. Для этого случая график разрешающей способности следует сместить влево, учитывая выигрыш по чувствительности за счет визуального интегрирования примерно в 2 раза.



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

Рис. 4. График чувствительности.

Полученные зависимости (рис. 4) наглядно показывают возможности предельной чувствительности телевизионной камеры типа VNA-753-H3, разработанной ЗАО "ЭВС" г. Санкт-Петербург. Спектральная характеристика ПЗС фотоприемника типа ICX-659AL показана на рисунке 5.



Рис. 5. Спектральная чувствительность фотоприемника.

Проанализируем основные аспекты работы твк VNA-753-H3, необходимые для анализа зарегистрированных кадров в эксперименте.

Свет (поток фотонов), отражаясь от объектов и пройдя через объектив телевизионной камеры, попадает на фоточувствительную поверхность матрицы ПЗС. На границе раздела полупроводник-диэлектрик фотоны преобразуются в фотоэлектроны, которые собираются в накопительных ячейках – пикселях матрицы ПЗС. Ночью поток фотонов уменьшается. Число фотоэлектронов, накапливаемых в пикселе изображения за кадр, уменьшается с сотен тысяч днем до десятков и даже единиц ночью. Шум становится главным препятствием получения качественного изображения.

Источников шума два. Первый обусловлен дискретной природой света. Можно сказать, что световой поток шумит (рис. 6).



Рис. 6. Шумы фотоприемника.

Фотоны падают на фоточувствительную поверхность неравномерно по времени и неточно в пространстве. Поэтому нельзя измерить один фотон. Измерить группу фотонов можно с точностью до фотонного шума, определяемого корнем квадратным из их числа. Чем больше фотонов в пикселе, тем лучше отношение сигнал/ шум и тем более качественное и четкое изображение (рис. 7).

Считая, что квантовый выход стандартных ПЗС примерно 0,2 и время накопления поля 20 мс можно определить, что минимальная плотность потока фотонов должна быть 30/0,2·10/0,02=75000 фотонов/элемент/ секунду.



Рис. 7. К чувствительности телевизионных камер.

При объективе с относительным отверстием F1,2 такая плотность фотонов примерно соответствует чувствительности стандартной телевизионной камеры 0,02 люкса на объекте. При столь малой освещённости уровень сигнала на выходе ПЗС уменьшается до единиц милливольт. Его нужно усилить, иначе мы увидим лишь черный экран видеомонитора. При усилении одновременно с сигналом возрастает шум, который днем был незаметен. В результате на экране видеомонитора появляется шум, напоминающий кружащиеся белосерые снежинки.

Существуют различные методы повышения чувствительности телевизионных камер: аналоговые и цифровые, с помощью изменения режима ПЗС и путем использования специальной оптики и т.д. Множество этих способов основано на фундаментальном принципе выделения сигнала из шума "принципе накопления энергии сигнала". Этот принцип базируется на коренном отличии сигнала от шума. Сигнал всегда однополярный (в телевидении положительный) и имеет ограниченную полосу частот. Шум всегда дифференциальный с нулевым математическим ожиданием и со значительно более широкой полосой частот. В результате простое сложение (накопление) порций "сигнал плюс шум" будет приводить к линейному росту уровня сигнала и только к замедленному (по закону корня квадратного) росту среднего отклонения размаха шума (рис. 8).



Рис. 8. Накопление сигнала с шумом (стандартный метод).

Каждые 100 сложений улучшают отношение сигнал/ шум в 10 раз. Принцип накопления энергии сигнала используется во всех способах повышения чувствительности, будь это пространственно-временное суммирование или низкочастотная фильтрация.

В телевизионной камеру VNA-753-НЗ используется особый алгоритм повышения чувствительности, который можно условно назвать "накопление до воздействия шума". Суть алгоритма в том, что дополнительное суммирование (накопление) сигнала производится в самой матрице ПЗС до того, как сигнал попал в выходное устройство и к нему присоединился шум считывания. В результате происходит сложение сигнала без сложения шума, а шум добавляется в выходном устройстве ПЗС один раз на каждую сумму сигналов. В результате четырехкратное сложение приводит к четырехкратному росту отношения сигнал/шум, а не к 2-х кратному, как в обычных методах (рис. 9).



Рис. 9. Накопление сигнала с шумом в твк VNA-753-H3.

Этот режим возможен благодаря тому, что при малых сигналах шум считывания значительно превосходит фотонный шум и последний практически не оказывает влияния на результат накопления. В телекамере VNA-753-H3 используются 2 вида «ночных» режимов, в которых работает накопление сигнала до воздействия шума.

"Ночной" режим 1 заключается в автоматическом обмене разрешающей способности камеры на чувствительность при малых уровнях освещённости. Максимальное число сложений равное 10 в камерах стандартного разрешения и 12 в камерах высокого разрешения приводит к пропорциональному росту чувствительности в 10-12 раз соответственно.

Второй "ночной" режим заключается в увеличении времени накопления телевизионной камеры до 16 телевизионных кадров при уменьшении освещённости (рис. 10).



Рис. 10. Режимы адаптации.

Суммарный увеличение чувствительности в режимах 1+2 достигает 100 раз. Для видеозаписи использовался тестовый монитор со встроенным видеорегистратором, осуществляющим запись изображения в формате 320×240 пикселей с частотой 25 кадров в секунду. Так как формат записи меньше формата ПЗС телевизионной камеры более, чем в 2 раза, то мы не будем видеть ухудшения разрешающей способности из-за работы режима бининга, а будем видеть увеличение яркости изображения при отработке каждый раз при срабатывании режима суммирования.

В условиях эксперимента ограничение постороннего света вводит камеру VNA-753-H3 в режим максимальной чувствительности, что хорошо заметно по шумам, проявляющимся в виде белых точек, хаотично расположенных и перемещающихся от кадра к кадру (рис. 11).



Рис. 11. «Темновой» кадр.

На "темновом" кадре видна слабо просматриваемая кювета (квадрат со стороной 55×55 мм, развернутый на угол ~ 45°) им, что объясняется прохождением какой-то малой части ИК диапазона спектра, который пропускают стенки кюветы, изготовленной из пластика. При таком малом освещении адаптивный механизм телевизионной камеры VNA-753-H3 вводит ее в режим максимального суммирования кадров (сложение 16 кадров длительностью 20 мс) и максимального бининга (объединение 12 пикселей в 1), т.е. мы регистрируем изображение, эквивалентное времени накопления 0,32 с.

При увеличении освещенности твк начинает работать адаптивный механизм камеры, уменьшающий количество складываемых кадров. Ориентировочное время отработки лежит в диапазоне от 2-х до 5-х с.

Параметры пучка (длительность импульса – 4 мкс, частота импульсов – 50 Гц, длительность цикла импульсов – 10 сек, перерыв между циклами – 10 сек) позволяют твк VNA-753-H3 войти в установившийся режим и регистрировать устойчивое изображение.

При достаточно большой длительности цикла (10 сек) время отработки механизма адаптации можно более точно определить экспериментально по анализу полученных кадров до установления стабильного изображения.

Смотрим начало пучка (рис. 12).



Рис. 12. 1-я секунда цикла. 10-й кадр видеорегистратора (пройдено ~ 400 мс по времени). Регистрируется начало свечения воды в кювете.

5. АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ И ОЦЕНКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОГЛОЩЕННОЙ ДОЗЫ

Сущность данной методики заключается в следующем. По снимкам с инфракрасной камеры анализируется точное положение и размеры энерговыделения:

кювета (фантом) разбивается на координатную сетку "бины", привязанную к системе координат, которыми являются границы квадрата стенок кюветы.
Энерговыделение в кювете мы видим в виде "светящегося яйца" (так в дальнейшем будем называть область энерговыделения на фото);

 по интенсивности свечения в каждом "бине" можно судить о выделившейся в этом "бине" энергии – поглощенной дозе;

по интенсивности света в каждом "бине", составляется таблица цифровых значений, отнормированная на максимальную яркость и шумовые сигналы.

С помощью программы обработки по этим таблицам определяют поглощенную дозу, выделившуюся в "светящемся яйце".

В данной работе мы не обсуждаем программу обработки. Проводится только приближенная оценка поглощенной дозы в фантоме с водой. Проводится

временной анализ процессов энерговыделения в фантоме в процессе сброса пучка электронов на фантом.

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

В этом параграфе анализируются процессы, происходящие в кювете за 10 секунд одного из сбросов электронного пучка.

Анализ результатов начинается с темнового кадра – Рис.11.

Как упоминалось - установка во время сброса пучка закрывалась дополнительно черным чехлом из фетра – для уменьшения прохождения света через полиэтиленовые стенки трубы установки.

В условиях эксперимента ограничение постороннего света вводит камеру VNA-753-H3 в режим максимальной чувствительности, что хорошо заметно по шумам, проявляющимся в виде белых точек, хаотично расположенных и перемещающихся от кадра к кадру (Рис. 11). Начало пучка также характеризуется большими шумами (Рис. 12).

На 10-м кадре видеорегистратора (пройдено ~ 400 мс по времени) регистрируется начало свечения воды в кювете (рис.13).



Рис. 13. 1-я секунда цикла. 20-й кадр видеорегистратора (пройдено ~ 800 мс по времени). Интенсивность свечения воды в кювете увеличивается и начинает работать механизм адаптации по времени накопления твк.

На 2-й секунде цикла регистрируется максимальная величина свечения (рис.14).



Рис. 14. 2-я секунда цикла. Интенсивность свечения воды в кювете возросла до максимума и механизм адаптации уменьшил время накопления до минимума (заметно уменьшение шумов).

На 3-ей секунде цикла интенсивность свечения воды в кювете становится постоянной, механизм адаптации увеличил время накопления в два раза. Стабильности изображения от твк еще нет, механизм адаптации продолжает работать.

На 4-й секунде цикла интенсивность свечения воды в кювете установилась постоянной и механизм адаптации стабилизировал время накопления. Проявляется стабильность изображения, свидетельствующая о стабильности установления режима механизма адаптации твк.

На секундах с 5-й по 9-ю кадры стабильны и пригодны для обработки (рис. 15).



Рис. 15. 7-я секунда цикла. Стабильное изображение.

На 12-й секунде цикла интенсивность свечения воды в кювете начинает уменьшаться (рис. 16).



Рис. 16. Начало 13-й секунды регистрации цикла. Облучения нет, регистрируется уменьшение размеров светящейся области.

С 14-й секунды цикла время накопления начинает увеличиваться и изображение от твк через 2-4 сек выдается в режиме максимальной чувствительности (максимального времени накопления 0,32 с). Мы снова начинаем видеть "темновой" кадр – Рис. 11.

Все последующие циклы регистрировались практически одинаковыми кадрами видеорегистратора.

6. ОЦЕНКА ПОГЛОЩЕННОЙ ДОЗЫ В ФАНТОМЕ

Программа обработки данных позволяет обрабатывать изображения, анализировать кадры и проводить оценку поглощенной дозы.

Также для нашего эксперимента был проведен теоретический расчет поглощенной дозы, в который вводились все исходные данные нашего эксперимента:

– интенсивность пучка электронов за импульс 4 мкс равна 7,5×10⁺¹¹;

- частота посылок 50 Гц;

– размер пучка на входе в фантом имеет диаметр 8 мм;

- размер фантома – кубик с водой 55×55×55 мм;

– пучок входил по центру фантома;

 поперечное распределение частиц на входе фантома считалось равномерным;

– энерговыделение проявляется в виде сферы в центре фантома радиусом 7,5 мм;

За 500 импульсов выделилась доза, равная 2,2936×10⁺⁴ Гр (дисперсия 0,0293).

Компьютерное моделирование взаимодействия электронного пучка с фантомом было проведено пакетом программ [4].

Оценка поглощенной дозы была проведена численным экспериментом средствами пакета программ mcnp4. Расчет был проведен А.Е. Чернуха из "Медицинского радиологического научного центра" г. Обнинск.

Снижение интенсивности пучка ускорителя, что возможно регулировкой режима работы ускорителя, а также малые размеры формирования поглощенной дозы согласуются с возможным использованием ускорителя "Пахра" для биоло-гических экспериментов.

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

Список литературы.

1. *Медведев А.В., Касауров Б.С., Гринкевич А.В., Князева С.Н.* Малогабаритная зрительная трубка для низких уровней освещенности // Оптико-механическая промышленность, 1989, № 9, стр. 28-29.

2. *Турыгин И.А.* "Прикладная оптика", М., Машиностроение, 1966, стр. 8, 48, 171.

3. *Медведев А.В., Гринкевич А.В., Гундяк М.И., Никошин В.В.* Зрительная труба ночного видения H3T-3 // Оптический журнал, 1993, № 4, стр. 51-53.

4. *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.

Александр Васильевич ГРИНКЕВИЧ Виктор Валентинович СИКСИН УСТАНОВКА ДЛЯ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ОБЛАСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ПОГЛОЩЕННЫХ ДОЗ В ФАНТОМЕ С ВОДОЙ НА ПУЧКЕ ЭЛЕКТРОНОВ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ БИОЛОГИЧЕСКИХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Формат 60х84/16. П. л. 1,5. Тираж 140 экз. Заказ № 35 Отпечатано с оригинал-макета заказчика в типографии РИИС ФИАН 119991 Москва, Ленинский проспект 53