

НПО УЧЕБНОЙ ТЕХНИКИ «ТУЛАНАУЧПРИБОР»

МЕТОДИЧЕСКОЕ РУКОВОДСТВО ПО ВЫПОЛНЕНИЮ
ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ



УМК ФЯЛ-06

**ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ γ -ЧАСТИЦ С ВЕЩЕСТВОМ.
СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫЙ СЧЁТЧИК γ -ЧАСТИЦ
АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ ВЕРСИЯ ДЛЯ РАБОТЫ С ПК.**

Тула, 2016 г.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА.

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ γ -ЧАСТИЦ С ВЕЩЕСТВОМ. СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫЙ СЧЁТЧИК γ -ЧАСТИЦ АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ ВЕРСИЯ ДЛЯ РАБОТЫ С ПК.

Цель работы: ознакомиться с принципом работы сцинтилляционного счетчика γ -излучения на примере его учебной модели, освоить основные приемы работы с гамма-спектрами.

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ.

Введение.

Сцинтилляционный метод регистрации частиц – один из наиболее старых методов регистрации. Еще в 1919 г. в опытах по рассеянию заряженных частиц на ядрах Э. Резерфорд с сотрудниками регистрировали α -частицы, визуально наблюдая вспышки света в ZnS(Ag). Однако широкое развитие сцинтилляционный метод регистрации частиц получил лишь после изобретения фотоэлектронных умножителей – приборов, обладающих способностью регистрировать слабые вспышки света.

Один из первых фотоумножителей был построен Л. А. Кубецким в СССР в начале 40-х годов XX в. И с 1947 г. началось интенсивное развитие сцинтилляционного метода регистрации. Благодаря своей высокой эффективности сцинтилляционные детекторы и спектрометры получили применение в ядерной физике, биологии, геологии, медицине и в других отраслях науки и техники.

Основными элементами сцинтилляционного детектора являются *сцинтиллятор, фотоэлектронный умножитель (ФЭУ), оптическая система* для сочленения сцинтиллятора и ФЭУ.

При взаимодействии с веществом сцинтиллятора заряженные частицы теряют свою энергию на возбуждение и ионизацию атомов среды. Гамма-излучение, как излучение косвенно ионизирующее, само непосредственно ионизацию и возбуждение не производит: ионизируют и возбуждают атомы вещества сцинтиллятора электроны, образованные при взаимодействии γ -излучения с веществом сцинтиллятора. Возникающее при снятии возбуждения атомов излучение выходит из среды в виде световых вспышек-сцинтилляций, число фотонов в которых зависит как от свойства и размеров сцинтиллятора, так и от вида частиц и энергии, передаваемой сцинтиллятору этими частицами.

Для регистрации этих сцинтилляций используется ФЭУ, преобразующий световые вспышки в электрические импульсы напряжения, поступающие далее в измерительный блок.

Взаимодействие гамма-квантов с веществом.

Считается, что ядерный гамма-квант - это квант электромагнитного излучения с энергией, лежащей в диапазоне 10 КэВ - 10 МэВ, испускаемый ядром. Гамма-квант можно рассматривать как частицу без массы и заряда, перемещающуюся со скоростью света. Несмотря на отсутствие заряда, гамма-кванты способны взаимодействовать с веществом, главным образом с электронами в атомах. Существуют три вида взаимодействия гамма-квантов с электронами: фотоэффект, комптоновское рассеяние и образование электрон-позитронных пар.

Фотоэффект - взаимодействие, при котором энергия гамма-кванта полностью (исключая энергию связи электрона в атоме) переходит в кинетическую энергию электрона. При этом гамма-квант исчезает, а электрон теряет свою энергию на ионизацию атомов, образуя определенное количество свободных зарядов. Существенным является тот факт, что именно вся энергия гамма-кванта (за исключением очень малой ее части) переходит к электрону, а потом преобразуется в энергию свободных зарядов. Количество свободных зарядов пропорционально энергии электрона, а стало быть, и гамма-кванта. Поэтому, измерив заряд, образовавшийся в веществе, можно определить энергию гамма-кванта.

К сожалению, с двумя другими типами взаимодействий дело обстоит гораздо сложнее. При комптоновском рассеянии гамма-кванта на электроне гамма-квант передает лишь часть своей энергии электрону и при этом не исчезает. Таким образом, получаются гамма-квант меньшей энергии и электрон. Часть энергии, передаваемая гамма-квантом электрону, зависит от углов разлета гамма-кванта и электрона после взаимодействия.

Это означает, что знание энергии электрона после комптоновского рассеяния не дает никакой информации о начальной энергии гамма-кванта.

Образование электрон-позитронных пар происходит, если энергия гамма-кванта превышает 1.022 МэВ. При этом образуются электрон и позитрон, а гамма-квант исчезает. Электрон затем теряет свою энергию в среде, а позитрон аннигилирует, испуская два гамма-кванта с энергией 0.511 МэВ. В свою очередь, вылетевшие гамма-кванты участвуют в процессах фотопоглощения и комптоновского рассеяния. При образовании пар, таким образом, тоже нельзя получить информацию об энергии первичного гамма-кванта.

Идеальный детектор должен преобразовывать всю энергию гамма-кванта в электрический импульс, величина которого прямо пропорциональна энергии кванта, поэтому из всех трех процессов взаимодействия гамма-квантов с веществом наиболее информативным является фотоэффект.

Для получения хороших результатов при измерении активности необходимо сделать число взаимодействий, проходящих по каналу фотоэффекта, максимальным, уменьшив число остальных двух видов, которые мешают регистрации. Поскольку вероятность фотоэффекта в зависимости от среднего заряда атомов вещества (Z) увеличивается пропорционально $(Z^4) - (Z^5)$ степени,

то необходимо использовать в детекторах вещества с максимальным Z .



Рис 1.1. Коэффициенты поглощения для NaI.

Конечно, все процессы взаимодействия могут иметь место даже для одного гамма-кванта. Например, образовав пару, гамма-квант исчез, позитрон аннигилировал, производя два гамма-кванта по 0.511 МэВ, из которых один комптоновски рассеялся, а другой поглотился но фотоэффекту. Если энергия гамма-кванта менее 100 КэВ, то главным процессом является фотоэффект, при энергии больше 100 КэВ доля рассеянных гамма-квантов увеличивается, а при энергии, большей 1.022 МэВ, начинает вносить вклад образование пар.

На рисунке Рис. 1.1 представлены вероятности всех процессов в зависимости от энергии гамма-квантов для NaI - кристалла, используемого в сцинтилляционных детекторах. Итак, для того, чтобы определить энергию гамма-кванта, необходимо измерить заряд, образующийся в детекторе при полном поглощении гамма-кванта.

Основные характеристики сцинтилляторов.

Сцинтилляторами обычно называют такие вещества, которые под действием ионизирующего излучения испускают фотоны в видимой или ультрафиолетовой части спектра. Причем при наличии большой вероятности испускания фотонов атомами и молекулами в возбужденных состояниях вероятность поглощения этих испущенных фотонов самим же сцинтиллирующим веществом должна быть мала: т. е. спектр испускания электромагнитного излучения должен быть сдвинут относительно спектра поглощения.

Все сцинтилляционные вещества можно разделить на три класса: на основе тех или иных органических соединений, неорганические кристаллы и газы.

Из органических соединений чаще всего применяются жидкие и твердые растворы ароматических соединений или монокристаллы антрацена, стильбена, толана и др.

Наиболее распространенными сцинтилляторами из неорганических кристаллов являются иодиты щелочных металлов, активированные таллием, и сульфид цинка, активированный серебром: NaJ(Tl), CsJ(Tl), ZnS(Ag). Чистые неактивированные кристаллы при комнатной температуре не обладают сцинтиллирующими свойствами.

С точки зрения регистрации излучений все сцинтилляторы, и органические и неорганические, должны удовлетворять некоторым требованиям как общего характера, так и специальным, обусловленным природой регистрируемых

частиц.

Прежде всего вещество должно обладать высоким световым выходом χ , определяемым как отношение среднего числа фотонов \bar{a} , возникающих в процессе одной сцинтилляции, к энергии E , потерянной регистрируемой частицей в сцинтилляторе:

$$\chi = \bar{a}/E.$$

Так как практический интерес представляет число фотонов, выходящих из сцинтиллятора $\bar{a}_{\text{вн}}$, то целесообразно ввести понятие внешнего светового выхода $\chi_{\text{вн}}$:

$$\chi_{\text{вн}} = \bar{a}_{\text{вн}}/E = \bar{a}\varphi/E = \chi\varphi,$$

где $\varphi = \bar{a}_{\text{вн}}/\bar{a}$ – коэффициент выхода фотонов из сцинтиллятора. Необходимо отметить, что внешний световой выход зависит от величины сдвига спектров испускания и поглощения, т. е. от прозрачности сцинтиллятора по отношению к собственному излучению, а также от толщины сцинтиллятора, количества примесей, уменьшающих его прозрачность, от состояния его поверхностей и т. п. В идеальных, абсолютно прозрачных для собственного излучения сцинтилляторах $\chi_{\text{вн}} = \chi$.

Кроме светового выхода можно ввести понятие энергетического выхода ξ , выражающего отношение энергии E_a фотонов, возникающих в процессе одной сцинтилляции, к энергии E , потерянной регистрируемой частицей в сцинтилляторе:

$$\xi = E_a/E = \bar{a}\bar{h\nu}/E = \chi\bar{h\nu},$$

где $\bar{h\nu}$ – средняя энергия фотонов сцинтилляции.

Процесс высвечивания сцинтилляции занимает конечное время. Так как время нарастания сцинтилляции значительно меньше времени спада (затухания сцинтилляции), то во всех практических случаях длительность сцинтилляции в целом можно характеризовать одной только постоянной времени τ затухания процесса:

$$J = J_0 e^{-t/\tau}.$$

Величина τ – время, в течение которого интенсивность высвечивания J падает в e раз. В экспериментах, где требуется высокое временное разрешение, сцинтилляторы выбираются с достаточно малым временем высвечивания.

Применяемые сцинтиллирующие неорганические кристаллы (NaJ(Tl), CsJ(Tl), LiJ(Sn), LiJ(Tl), ZnS(Ag)) характеризуются большим световым выходом и временем высвечивания (порядка $10^{-4} - 10^{-7}$ с). Органические кристаллы (стильбен, антрацен и другие) характеризуются не только меньшим световым

выходом, чем неорганические, но и меньшим временем высвечивания (порядка 10^{-8} – 10^{-9} с). Из органических сцинтиллирующих растворов обычно применяются паратерфенил в ксилоле.

Процессы, происходящие в фотоумножителях, и основные их характеристики.

Импульс света, возникающий в сцинтилляторе при прохождении ионизирующей частицы, с помощью фотоэлектронного умножителя преобразуется в электрический импульс.

Фотоэлектронный умножитель – это фотоэлемент с многократным усилением, которое основано на явлении вторичной электронной эмиссии. Он состоит из фотокатода, фокусирующего устройства, нескольких динодов и анода (рис. 1.2). Все электроды ФЭУ помещены в баллон с высоким вакуумом. Фотокатод выполнен в виде тонкого полупрозрачного слоя и находится на внутренней стороне торцевой стенки стеклянного баллона ФЭУ. Для увеличения коэффициента вторичной эмиссии диноды покрыты тонкой пленкой вещества с малой работой выхода для электронов.

При работе ФЭУ ко всем его электродам приложены определенные разности потенциалов. Проникая сквозь прозрачное стекло, кванты света вырывают из светочувствительного слоя фотокатода некоторое количество электронов. Фотоэлектроны, выходящие с разными скоростями и под разными углами к поверхности катода, ускоряются электрическим полем в вакууме и с помощью фокусирующей системы собираются на первом диноде умножителя.

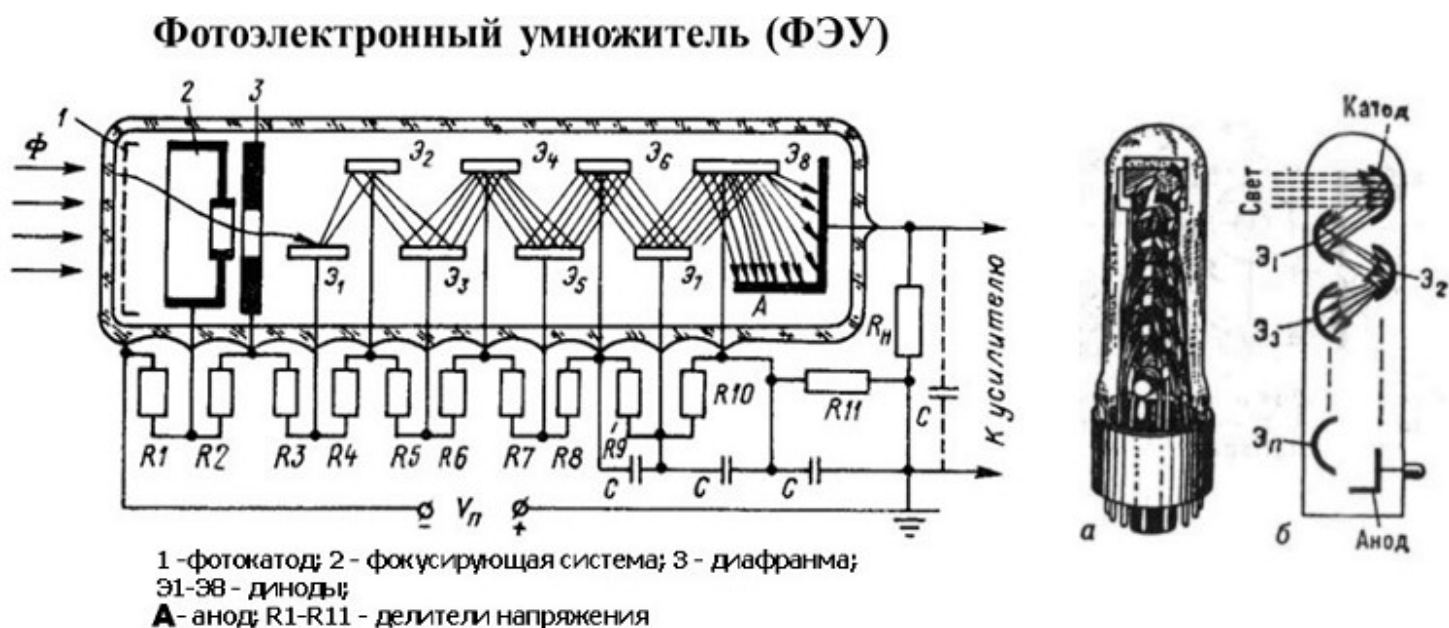


Рис 1.2. Схема типичного ФЭУ и чертеж многокаскадного фотоэлектронного умножителя (ФЭУ) с боковым входом: а - внешний вид; б - схема устройства; Э₁, Э₂, Э₃, ..., Э_n - эмиттеры (диноды)

При ударах электронов о первый диод происходит вторичная электронная эмиссия. Электроны, выбитые из первого диода, вновь ускоряются в следующем межэлектродном промежутке и, попадая на второй диод, вызывают в свою очередь вторичную электронную эмиссию со второго диода. Для характеристики электронной эмиссии вводится величина, называемая коэффициентом вторичной эмиссии σ , представляющим собой число вторичных электронов, выбитых одним первичным электроном. Описанный процесс происходит последовательно на всех диодах, и в зависимости от свойств и числа диодов при $\sigma > 1$ число электронов на последних диодах может превысить первоначальное число фотоэлектронов на несколько порядков. Электроны с последнего диода собираются на аноде фотоумножителя.

Физические явления, лежащие в основе работы ФЭУ – фотоэлектрический эффект и вторичная электронная эмиссия, носят статистический характер. Поэтому параметры ФЭУ также имеют статистическую природу и, говоря о них, будем подразумевать средние значения этих параметров.

Характеристики фотокатода образуют группу светотехнических параметров ФЭУ. Из них наиболее важное значение имеют квантовый выход, спектральная характеристика, интегральная чувствительность.

Квантовый выход фотокатода ε представляет собой вероятность вырывания одного фотоэлектрона фотоном, попавшим на фотокатод. При этом подразумевается, что падающий на фотокатод свет близок к монохроматическому. Квантовый выход зависит от длины волны падающего света, материала фотокатода и его толщины. Численно он обычно выражается в процентах.

Зависимость ε от длины волны λ падающего света носит название *спектральной характеристики* фотокатода и обозначается $\varepsilon(\lambda)$.

Практически существенно не только число фотонов, испускаемых сцинтиллятором, но и степень перекрытия внешнего оптического спектра $F_{\text{вн}}(\nu)$ сцинтилляции со спектральной характеристикой $\varepsilon(\lambda)$ данного ФЭУ, определяемая коэффициентом согласования:

$$K = \left[\int_0^{\infty} F_{\text{вн}}(\nu) \varepsilon(\nu) d\nu \right] / \left[\int_0^{\infty} F_{\text{вн}}(\nu) d\nu \right].$$

Интегральная чувствительность фотокатода представляет собой отношение фототока к падающему на фотокатод световому потоку при освещении фотокатода источником белого света (сплошного спектра со всеми длинами волн) с определенной цветовой температурой.

Сбор фотоэлектронов на первый диод характеризуется коэффициентом сбора l , который может принимать значения от 0 до 100 %.

Умножительная система ФЭУ характеризуется *коэффициентом усиления* M . Последний определяется как отношение величины тока на выходе ФЭУ к его величине на входе умножительной системы. Коэффициент усиления ФЭУ равен: $M = \alpha \prod \sigma_i$, где α – коэффициент, определяющий долю электронов, попадающих с одного динода на другой; σ_i – коэффициент вторичной эмиссии i -го динода.

Необходимо отметить, что коэффициент вторичной эмиссии σ зависит не только от материала и состояния поверхности динода, но и от энергии первичных электронов, т. е. от ускоряющей разности потенциалов, приложенной к двум соседним динодам: с увеличением энергии электронов σ вначале растет, а затем выше энергии 100 – 1000 эВ (в зависимости от материала) падает. Физически такое поведение можно объяснить следующим. Первичные электроны, попадая в материал динода, в результате упругих и неупругих соударений передают свою энергию многим электронам среды. Чем выше энергия первичного электрона, тем большему числу электронов он передает свою энергию. Но чем выше энергия первичного электрона, тем на большую глубину он проникает и, следовательно, тем на большей глубине в материале приобретают энергию вторичные электроны. Последние могут покинуть материал динода только в том случае, если они образовались на глубине, которая меньше длины своего пробега в данном материале.

Зависимость коэффициента усиления M от напряжения питания приведена на рис. 1.3 (литературные данные).

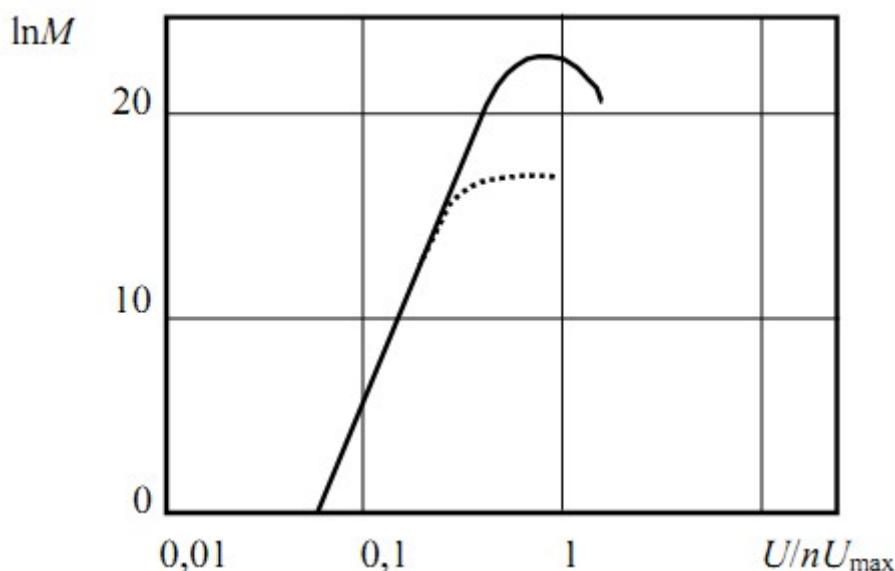


Рис 1.3. Зависимость коэффициента усиления ФЭУ от разности потенциалов между динодами для числа динодов $n = 10$ и $\sigma_{\max} = 10$

При высоких значениях мгновенных токов, обусловленных или очень большим коэффициентом усиления M , или очень большой интенсивностью вспышки, сказывается влияние объемного заряда, искажающего поле в области анода и последних динодов (пунктирная линия). Для некоторых ФЭУ этот эффект заметен при токах на аноде ~ 1 мА.

Произведение коэффициента усиления ФЭУ на коэффициент сбора на первый динод и на интегральную чувствительность фотокатода часто называют *общей чувствительностью* ФЭУ.

Если даже на фотокатод ФЭУ не падает световой поток, на выходе ФЭУ все-таки наблюдается некоторый ток, называемый темновым. Причиной этого являются термоэлектронная эмиссия с поверхности фотокатода и первых динодов, автоэлектронная холодная эмиссия, радиоактивность материала, из которого изготовлен ФЭУ, и ряд других причин.

Сцинтилляционный γ -спектрометр.

Простейшим вариантом сцинтилляционного γ -спектрометра является однокристалльный γ -спектрометр (рис. 1.4). Он состоит из фосфора (либо любого другого кристалла — сцинтиллятора), который регистрирует падающее на него γ -излучение, ФЭУ, усилителя импульсов с выхода ФЭУ и амплитудного анализатора. Энергию зарегистрированного γ -кванта определяют по величине амплитуды импульса, снимаемого с выхода ФЭУ. Вся система сцинтилляционного γ -спектрометра (фосфор, ФЭУ и усилитель) должна быть линейна. Требование линейности означает пропорциональность между амплитудой импульса, поступающего на амплитудный анализатор, и энергией γ -квантов E_γ , поглощенной в сцинтилляторе:

$$U_0 = aE_\gamma \quad (1.1)$$

где a — коэффициент пропорциональности.

Линейность является одной из характеристик сцинтилляционного γ -спектрометра. Ее проверяют путем измерения γ -спектров от стандартных источников, испускающих γ -кванты одной или нескольких известных энергий. Линейность является градуировочной кривой сцинтилляционного γ -спектрометра, так как каждому каналу амплитудного анализатора (амплитуда импульса) соответствует определенная энергия γ -кванта E_γ . Вследствие линейности всей системы энергия E_γ и номер канала N_k связаны линейным уравнением:

$$E_\gamma = aN_k + E_{\gamma 0}, \quad (1.2)$$

Пороговая энергия γ -квантов $E_{\gamma 0}$ пропорциональна минимальной амплитуде импульса, которую анализирует амплитудный анализатор. Импульсы, образуемые γ -квантами с энергией $E \leq E_{\gamma 0}$, меньше порога анализатора и не

регистрируются. Энергию $E_{\gamma 0}$ можно представить в виде:

$$E_{\gamma 0} = aN_k', \quad (1.3)$$

где N_k - порог анализатора, выраженный числом каналов. Одновременно N_k показывает истинный нуль амплитудного анализатора. Этот нуль прибора N_k находится путем экстраполяции прямой линейности в область отрицательных номеров каналов анализатора. Окончательно выражение для вычисления энергии γ -кванта имеет вид:

$$E_{\gamma} = a(N_k + N_k'). \quad (1.4)$$

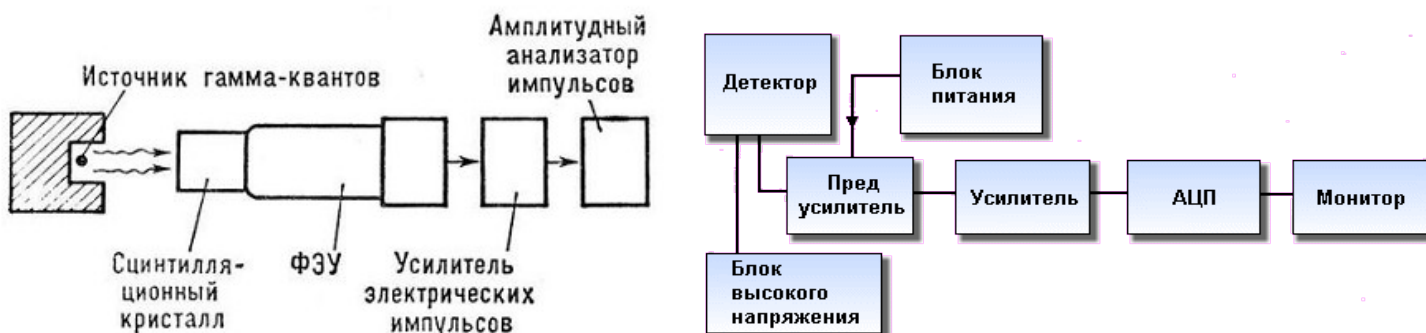


Рис 1.4. Схема сцинтиляционного гамма-спектрометра.

Благодаря высокой эффективности регистрации различных частиц и излучений, а также быстрой реакции, сцинтиляционный спектрометр нашёл широкое применение в ядерной спектроскопии и спектроскопии частиц высоких энергий. Однако, в области малых энергий (≤ 1 МэВ) сцинтиляционный спектрометр уступает в энергетическом разрешении пропорциональным счётчикам и полупроводниковым детекторам.

Разрешение сцинтиляционного γ -спектрометра формально определяется полушириной спектральной линии, как и у других спектрометров. Однако обычно спектральная линия представляется пикообразным распределением измеряемого параметра A . За полуширину спектральной линии принимается полная ширина на половине высоты этого пика. В сцинтиляционном γ -спектрометре форма спектральной линии значительно сложнее.

Для определения разрешения сцинтиляционного γ -спектрометра рассмотрим подробнее форму спектральной линии такого спектрометра. γ -Кванты порождают в сцинтиляторе фотоэлектроны, комптон-электроны и пары электрон-позитрон вследствие трех основных процессов взаимодействия γ -излучения с атомными электронами и ядрами фосфора. Каждый из этих независимых процессов взаимодействия γ -квантов с веществом дает свое

распределение импульсов по амплитудам на выходе ФЭУ. Накладываясь друг на друга, все три распределения образуют форму спектральной линии от моноэнергетического γ -излучения. Форма спектральной линии зависит от энергии γ -квантов. В области энергии γ -квантов, меньших 1,2 МэВ, эффект образования пар в фосфоре маловероятен и этим эффектом можно пренебречь, а форма спектральной линии связана с появлением фото-и комптон-электронов.

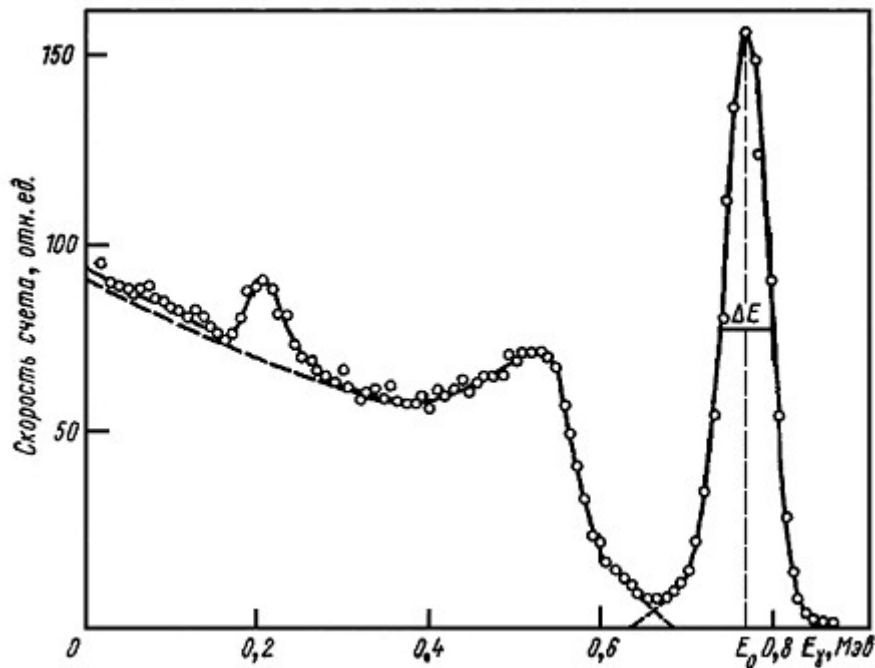


Рис 1.5. Распределение амплитуд импульсов при энергии γ -квантов 0,765 МэВ от источника Nb^{95} .

В фотоэффекте вся энергия γ -кванта передается одному из атомных электронов фосфора (сцинтиллятора). Вследствие этого на выходе ФЭУ возникает пикообразное распределение амплитуд импульсов, называемое фотопиком, наиболее вероятным значением амплитуды U_0 (Рис. 1.5). Значение амплитуды U_0 соответствует энергии моноэнергетических γ -квантов E_0 , падающих на сцинтиллятор. Ширина фотопика ΔE зависит от флуктуации числа фотонов света, появляющихся при торможении фотоэлектронов в фосфоре от неодинаковых условий сбора света на фотокатод ФЭУ (место поглощения γ -кванта в фосфоре), от различных вспышек, флуктуации импульса тока электронов в ФЭУ и ряда других причин.

В комптон-эффекте от моноэнергетических γ -квантов образуются комптон-электроны с неодинаковой энергией. Вследствие этого на выходе ФЭУ возникает непрерывное распределение импульсов по амплитуде от нуля до значения U_0 (Рис. 1.5). Таким образом, полная форма спектральной линии представляет собой непрерывное распределение амплитуд импульсов с фотопиком на конце этого распределения. Небольшой пик над непрерывным комптоновским распределением называют пиком обратного рассеяния. Часть γ -квантов, прошедших сквозь сцинтиллятор, рассеивается на

конструктивных элементах ФЭУ. Энергию рассеянных γ -квантов определяют по формуле:

$$E_{\gamma} = \frac{E_0}{1 + \frac{E_0}{m_0 c^2} (1 - \cos \theta)}, \quad (1.5)$$

где E_0 - энергия падающих на фосфор γ -квантов; $m_0 c^2$ - энергия покоя электрона; θ - угол рассеяния γ -кванта.

При больших углах θ , близких к $\theta \approx 180^\circ$, энергия рассеянных γ -квантов почти постоянна и близка к энергии:

$$E_{\lambda}' \approx \frac{E_0}{1 + \frac{2E_0}{m_0 c^2}} \quad (1.6)$$

Эти γ -кванты имеют относительно малые энергии и с большой вероятностью поглощаются фотоэлектрически фосфором, образуя фотопик обратного рассеяния.

Сложная форма спектральной линии сцинтилляционного γ -спектрометра не позволяет найти разрешение подобно тому, как это делается обычно. Из-за сложной формы спектров, понятие полуширины спектральной линии становится неопределенным. Разрешающую способность сцинтилляционного γ -спектрометра условились характеризовать разрешением по фотопику. За разрешение сцинтилляционного γ -спектрометра принимают отношение полуширины ΔU фотопика к наиболее вероятному значению амплитуды U_0 в этом распределении:

$$R = \Delta U / U_0.$$

Ввиду линейности между поглощенной энергией γ -кванта E_0 и амплитудой импульса U_0 разрешение равно:

$$R = \frac{\Delta U}{U_0} = \frac{\Delta E}{E_0}. \quad (1.7)$$

Это соотношение позволяет вычислить по известному R минимальную разность ΔE . Так, при разрешении 6% и энергии $E_0 = 1$ МэВ сцинтилляционный γ -спектрометр разделяет два γ -кванта, если их энергии различаются не менее чем на $\Delta E = R \cdot E_0 = 60$ кэВ.

Сложная форма спектральной линии существенно затрудняет анализ экспериментального распределения $\varphi(U_0)$. Очевидно, не каждому пику в распределении $\varphi(U_0)$ будут соответствовать определенные энергии γ -квантов. Экспериментальный пик может оказаться или парным, или полупарным от γ -квантов более высокой энергии. Только фотопикам, строго говоря, отвечают

отдельные линии в γ -спектре.

Сложные γ -спектры, состоящие из большого числа линий, и непрерывные γ -спектры дают столь сложное распределение $\phi(U_0)$, что становится невозможным установить истинное распределение $f(E)$ γ -квантов по энергии. Поэтому однокристалльные сцинтилляционные γ -спектрометры применяют для изучения простых спектров, состоящих из нескольких линий.

Работа сцинтилляционного детектора.

Сборка сцинтилляционного детектора заключается в рациональном сочленении сцинтиллятора и фотоумножителя, которое обеспечило бы при наибольшем отношении амплитуд импульсов, вызванных радиоактивным источником и темновым током, наилучшую разрешающую способность детектора как по амплитудам, так и по времени. Сцинтиллятор, имеющий обычно форму цилиндра рис. 2.1, устанавливается перед фотокатодом умножителя (см. рис. 2.2). Так как коэффициент преломления света для большинства сцинтилляторов довольно велик, значительная часть света, возникающего в сцинтилляторе, испытывает на его поверхности полное внутреннее отражение. Поэтому для обеспечения хорошего оптического контакта (и, следовательно, для повышения светосбора) между сцинтиллятором и фотокатодом вводится тонкий слой вещества с меньшим показателем преломления (силиконовое или вазелиновое масло, глицерин).

Радиоактивное излучение, падающее на сцинтиллятор, вызывает в нем вспышки – сцинтилляции. Световые кванты, попадая на фотокатод ФЭУ, выбивают фотоэлектроны, которые дают начало лавине. В момент прихода электронной лавины на анод ФЭУ на выходном нагрузочном сопротивлении (рис. 1.2) возникает импульс напряжения (тока).

Межэлектродные разности потенциалов задаются обычно с помощью делителя напряжения от высоковольтного источника питания. Изменяя напряжение, питающее делитель, можно варьировать в широких пределах коэффициент усиления ФЭУ. С увеличением напряжения на делителе ФЭУ коэффициент усиления быстро возрастает. Причиной этого является увеличение коэффициента вторичной эмиссии, а также некоторое улучшение фокусировки.



Рис 2.1. Сцинтилляционный кристалл.



Рис 2.2. Рабочая сборка ФЭУ-сцинтиллятор.

При измерении числа частиц очень важен параметр, который характеризует вероятность создания на выходе детектора электрического импульса при попадании частицы в детектор. Такой параметр носит название *эффективности* регистрации детектора η , определяющейся как *отношение числа электрических импульсов, зарегистрированных на выходе детектора в единицу времени, к числу частиц, попавших в детектор за то же время*. Эффективность регистрации является функцией как энергии и вида исследуемого излучения, так и размеров и типа детектора. Основным требованием к сцинтилляционным детекторам, как и ко всем детекторам вообще, является высокая эффективность регистрации. Как известно, сечения фотоэффекта и комптон-эффекта тем выше, чем больше Z вещества.

Достоинством сцинтилляционных детекторов является тот факт, что их эффективность регистрации для косвенно ионизирующих излучений (γ -излучение, рентгеновское излучение) благодаря большому Z сцинтилляторов на целый порядок превосходит эффективность регистрации газоразрядных счетчиков. В литературе указывается, что в случае γ -излучения для кристаллов NaJ(Tl) небольших размеров она составляет приблизительно 17 %.

Одним из основных требований к детекторам является малое *время разрешения* (оно определяет тот минимальный временной интервал между двумя последовательными частицами, которые детектор может зафиксировать раздельно). В сцинтилляционном детекторе при использовании неорганических кристаллов, время высвечивания которых сравнительно велико и составляет десятые доли микросекунды и больше, временные свойства фотоумножителя практически не играют никакой роли, и время разрешения всего сцинтилляционного детектора будет определяться временем высвечивания кристалла. При работе же с органическими сцинтилляторами (и особенно с жидкими и твердыми растворами), где время высвечивания очень мало, время разрешения фотоумножителя может оказаться сравнимым со временем высвечивания сцинтиллятора и при расчете разрешающей способности детектора по времени должно быть учтено.

Достоинством сцинтилляционного детектора является то, что его время разрешения на несколько порядков меньше времени разрешения газоразрядных детекторов. Применение сцинтилляционных детекторов в схемах совпадений с высокой разрешающей способностью открыло новые перспективы при исследовании разного рода одновременных процессов.

Кроме того, нужно отметить, что поскольку коэффициент вторичной эмиссии не зависит от числа падающих электронов, то ФЭУ представляет собой *линейный прибор*, т. е. заряд на аноде пропорционален числу первичных фотоэлектронов и соответственно интенсивности световой вспышки, попавшей на катод. А так как обычно энергия, потерянная частицей в кристалле, пропорциональна интенсивности световой вспышки, то амплитуда импульса на выходе ФЭУ пропорциональна потерянной энергии частицы. Это позволяет создавать на основе сцинтилляционного детектора различные приборы для

измерения энергии радиоактивного излучения, что невозможно при использовании гейгеровских счетчиков. И только, когда импульсы на выходе ФЭУ достаточно велики, линейность может нарушаться, как было указано выше, за счет искажения поля пространственным зарядом в области анода и последних динодов.

Важным моментом перед тем, как начинать измерения, является правильный подбор напряжения питания ФЭУ. В радиометрических измерениях, когда производится счет импульсов, для этих целей чаще всего используется счетная характеристика, т. е. зависимость скорости счета импульсов на

Число импульсов,
зарегистрированных
в единицу времени



Рис 2.3. Счетная характеристика прибора.

выходе детектора n от напряжения питания ФЭУ U (рис. 2.3).

Как видно из рис. 2.3, с ростом напряжения питания U величина n вначале растет, а далее становится постоянной. Это объясняется тем, что при малых величинах U значение коэффициента усиления ФЭУ M также мало. В результате амплитуда импульсов на выходе ФЭУ незначительна по величине и может оказаться ниже порога чувствительности регистрирующего устройства. В таком случае импульсы не будут зарегистрированы. С увеличением напряжения U растет коэффициент усиления M и амплитуда импульсов увеличивается настолько, что может превысить порог чувствительности регистрирующего устройства. В этот момент на пересчетном устройстве начинается счет импульсов.

При дальнейшем увеличении U еще бóльшая доля импульсов будет иметь амплитуду, превышающую порог чувствительности, что даст еще большее увеличение скорости счета n .

Дальнейшее повышение напряжения питания может привести к тому, что скорость счета импульсов n станет почти постоянной и не будет зависеть от величины U , так как амплитуды почти всех импульсов, поступающих с детектора, превышают порог чувствительности и почти все импульсы регистрируются.

При очень больших напряжениях U скорость счета n может резко возрасти из-за того, что амплитуда шумовых импульсов ФЭУ тоже становится очень большой.

Выделенная на рис. 3 область плато, где величина n слабо зависит от напряжения питания U , используется для подбора напряжения питания; обычно рабочее напряжение $U_{раб}$ выбирают на середине плато.

Критерием же оптимального рабочего напряжения $U_{раб}$ в спектрометрических измерениях является высокое энергетическое разрешение. Известно, что энергетическое разрешение детектора тем выше, чем выше

коэффициент усиления ФЭУ M , т. е. чем больше величина напряжения питания U .

Зарегистрированные и усиленные электрические импульсы специальным устройством - амплитудным анализатором - распределяются по каналам таким образом, что в данный канал попадают электрические импульсы только определенной амплитуды (энергии). На рис. 2.4 представлены спектры таких импульсов. По оси абсцисс отложены каналы (условные единицы, их можно перевести в длину волны либо энергию излучения), а по оси ординат - число импульсов, попавших в данный канал.

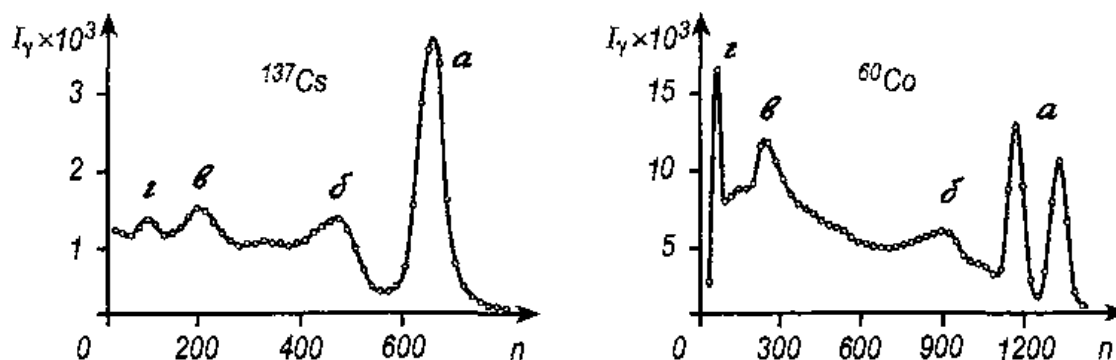


Рис. 2.4 Спектры γ -лучей препаратов ^{137}Cs ($E_\gamma=662$ кэВ) и ^{60}Co ($E_{\gamma_1}=1173$ кэВ и $E_{\gamma_2}=1332$ кэВ), измеренные с кристаллами $\text{NaJ}(\text{Tl})$

Наиболее выделяется в этих спектрах пик А (у препарата ^{60}Co этот пик расщеплен, т. к. изотоп испускает гамма-кванты с энергиями 1173,2 кэВ и 1332,5 кэВ). Это - так называемый "пик полного поглощения" или фотопик. Фиксируя этот пик, мы определяем максимальную энергию γ -кванта.

Непрерывное распределение импульсов меньших амплитуд создается электронами отдачи при комптоновском рассеянии γ -квантов в сцинтилляторе с последующим вылетом γ -квантов из кристалла (б), как было сказано выше. Согласно теории комптон-эффекта распределение электронов отдачи характеризуется возрастанием их числа вблизи граничной энергии. Это соответствует широкому максимуму в комптоновском распределении. Происхождение другого максимума («пик обратного рассеяния») связано с регистрацией γ -квантов, рассеянных на большие углы (150° — 180°) в окружающей защите (в). Из теории комптон-эффекта следует, что положение этого пика слабо зависит от энергии падающих γ -квантов и для γ -излучения радиоактивных источников до 3000 кэВ положение пика обратного рассеяния соответствует энергии электронов отдачи 70-400 кэВ.

При применении кристаллов NaJ и CsJ в области энергий падающих γ -квантов ниже 300 кэВ в спектре бывает виден *пик вылета*, связанный с выходом рентгеновских квантов йода из кристалла. Рентгеновские кванты йода образуются в результате появления вакансии на K -оболочке атома йода при

фотопоглощении. Если рентгеновские кванты образовались вблизи поверхности кристалла, имеется определенная вероятность их вылета из кристалла и вспышка, соответствующая полному поглощению, ослабляется. Положение пика вылета соответствует энергии $E_\gamma - E_K$ ($E_K = 28,5$ кэВ — энергия К-рентгеновских лучей йода).

При энергии γ -лучей больше 1022 кэВ в аппаратурном спектре появляются дополнительные пики, соответствующие вылету из кристалла одной или двух аннигиляционных γ -квантов (при $E_\gamma > 1022$ кэВ начинается процесс образования пар электрон-позитрон). Эти пики соответствуют энергиям: $E_1 = E_\gamma - 511$ кэВ и $E_2 = E_\gamma - 1022$ кэВ.

Как правило, радиоактивные источники окружены защитой, чаще всего свинцовой. При попадании γ -излучения или заряженных частиц, на материал защиты в ней возникает характеристическое рентгеновское излучение. Для свинца энергия этого излучения составляет 75 кэВ (К-рентгеновское излучение). Если не принято специальных мер, в аппаратурном спектре появляется пик, соответствующий этой энергии (γ).

В спектре ^{60}Co присутствует так называемый *пик суммы*, "Энергия" пика суммы соответствует суммарной энергии испускаемых гамма-квантов, одновременно попавших в сцинтиллятор ($E_{\text{сумм}} = 1173$ кэВ + 1332 кэВ = 2505 кэВ). Интенсивность пика суммы заметно слабее интенсивности пиков полного поглощения.

Таким образом спектр, получаемый на сцинтилляционном спектрометре имеет довольно сложный характер, так как на него накладываются кривые таких процессов, как пик обратного комптоновского рассеяния, пики рентгеновского излучения, которые образуются при выбивании γ -квантами электронов из внутренних оболочек атомов свинца защиты или при многократном рассеянии в ней γ -квантов. Все эти пики малоинтенсивны и положение их определяется с небольшой точностью.

Вид спектра, получаемый от источника ^{137}Cs с энергиями наиболее характерных пиков, приведен на рис. 2.5. На рис. 2.6. приведен вид спектра от калибровочного источника ^{60}Co . На рис. 2.7 приведены схемы распада данных изотопов.

Спектр обогащенного урана со степенью обогащения изотопом U^{235} в процентном соотношении к естественному составу 95 — 97 % приведен на рис. 2.8. Энергия, соответствующая пику полного поглощения в детекторе гамма-излучения ^{235}U составляет 185,7 кэВ. Зарегистрирована линия рентгеновской флуоресценции ^{235}U - линия $K\alpha_1$, соответствующая энергии $E_{K\alpha_1} = 98,4$ кэВ.

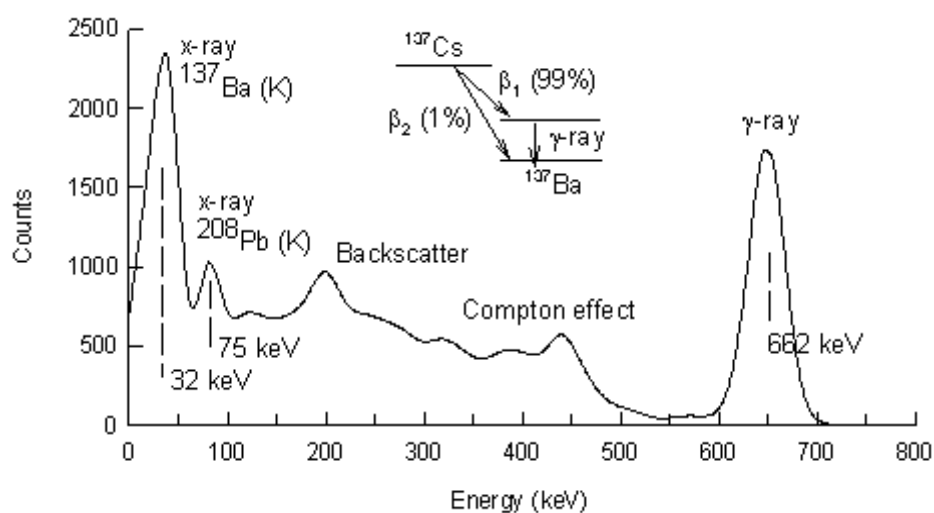


Рис 2.5. Распределение амплитуд импульсов от источника Cs^{137} .

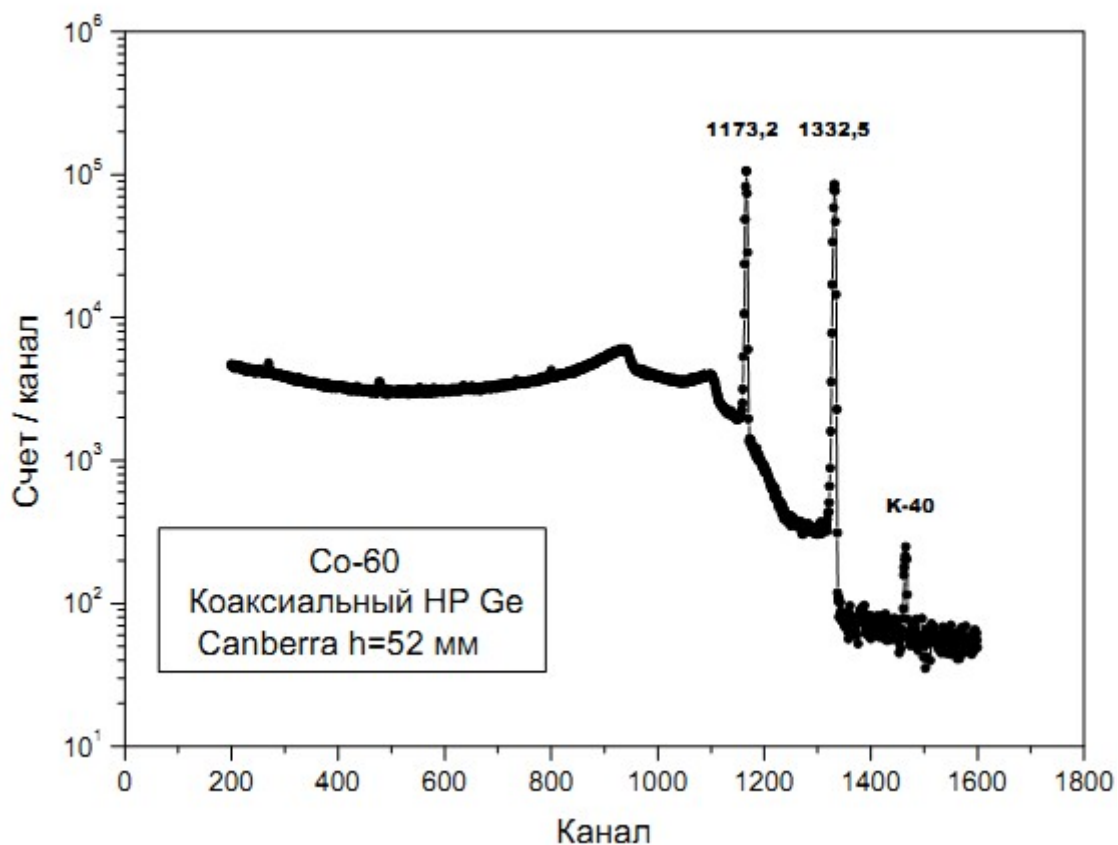


Рис 2.6. Распределение амплитуд импульсов от источника Co^{60} . Аппаратурный спектр, измеренный на коаксиальном полупроводниковом детекторе GC2518 Canberra

Co-60 ($T_{1/2}=5,271(1)$ лет)

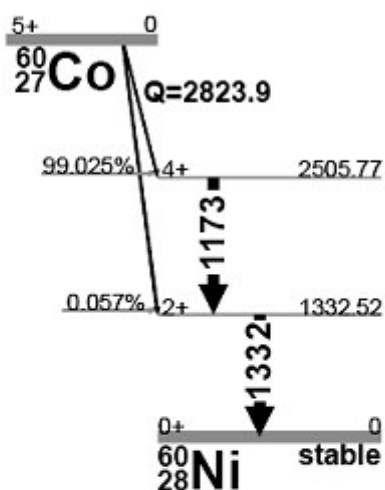


Схема распада Co-60

Энергия, кэВ	Квантовый выход на распад, % (Nudat 2.5)
1173,2	99,85(3)
1332,5	99,983(1)

Cs-137 ($T_{1/2}=30,07(3)$ лет)

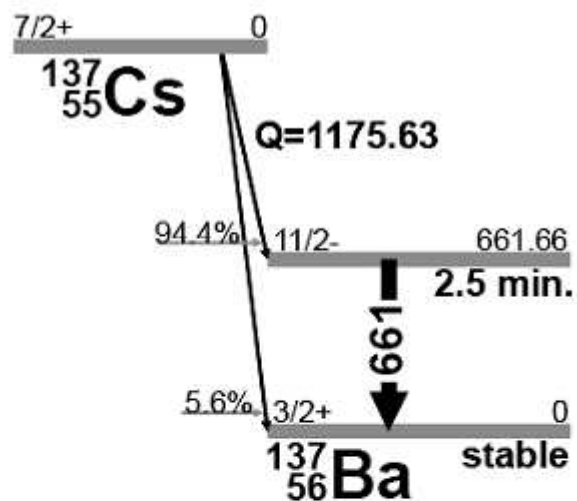


Схема распада Cs-137

Энергия, кэВ * - средняя энергия	Квантовый выход на распад, % (Nudat 2.5)	Квантовый выход на распад, % (JEFF 3.1)
31,82 XR α_2	1,99(5)	1,95(9)
32,19 XR α_1	3,64(10)	3,60(16)
32,06 XR α^*	5,63	5,95
36,30 XR $k\beta_3$	0,348(9)	
36,38 XR $k\beta_1$	0,672(18)	
37,26 XR $k\beta_2$	0,213(6)	
36,51 XR $k\beta^*$	1,233	1,31(6)
661,7	85,1(2)	85,0(2)

Рис 2.7. Схемы распада изотопов Co⁶⁰ и Cs¹³⁷.

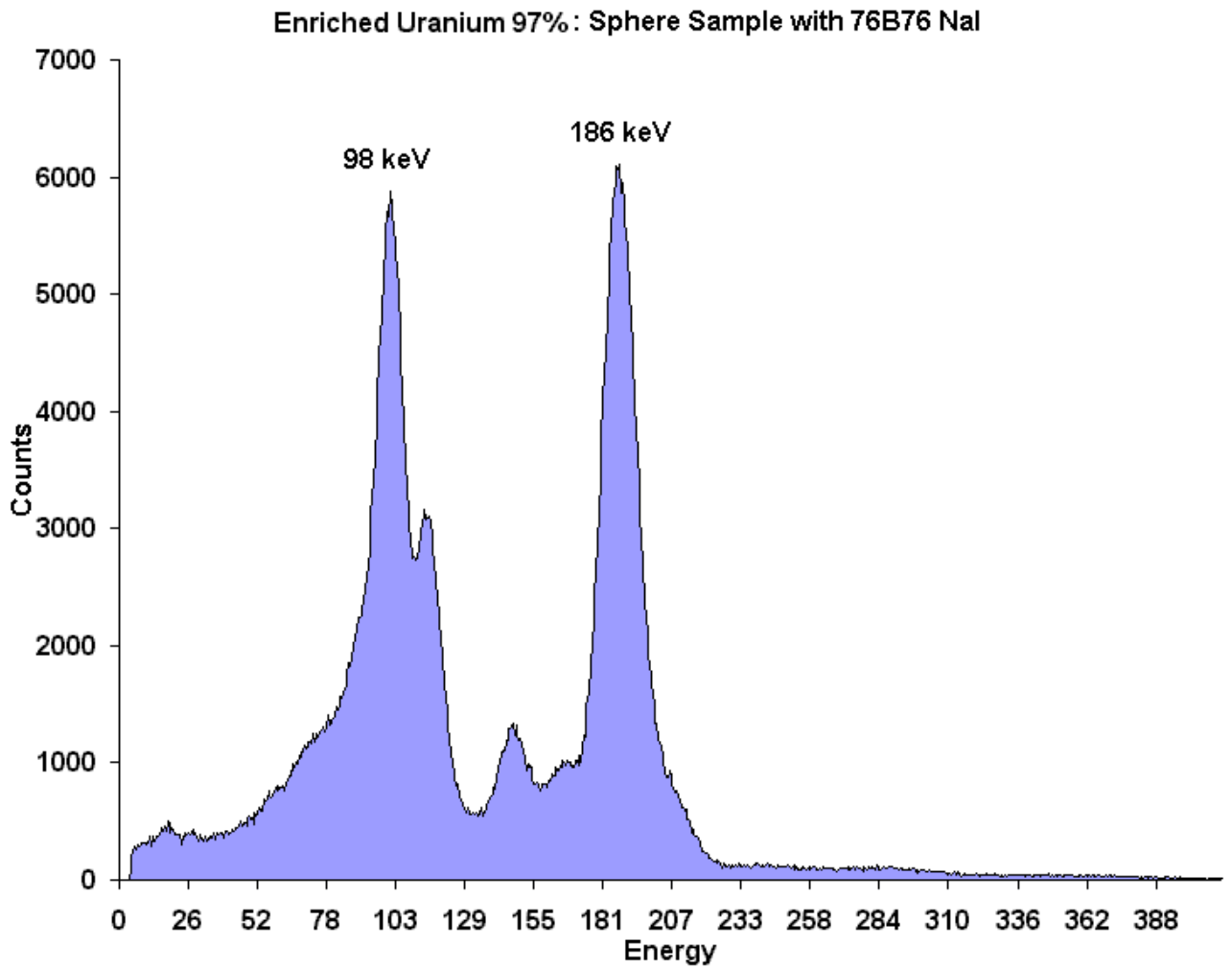


Рис 2.8. Распределение амплитуд импульсов от препарата урана с обогащением изотопом урана U^{235} порядка 95 — 97 %. Аппаратурный спектр, измеренный на коаксиальном полупроводниковом детекторе GC2518 Canberra

Приборы и оборудование.

Лабораторная работа по исследованию работы сцинтилляционного спектрометра выполняется на УМК ФЯЛ-06 (рис. 3.1), имеющим сопряжение с ПК, но допускающим ручной (автономный) режим работы. Все параметры эксперимента, установленные и измеренные значения параметров выводятся в соответствующие окна программы - оболочки для работы с установкой – LabVisual 2.5/3.1 и дублируются на ЖКД LCD дисплее учебной установки. Лабораторный комплекс может работать как в сопряжении с ПК, так и в ручном режиме работы, для которого не требуется наличие компьютера.

Соединение прибора с ПЭВМ для версии LabVisual-3 осуществляется через LAN (Ethernet) порт ПК (через сетевую карту).

Учебная установка состоит из двух блоков: 1) ПУЛЬТА УПРАВЛЕНИЯ и 2) БЛОКА ФЭУ, соединяемых между собой специальным кабелем из комплекта. ПУЛЬТ УПРАВЛЕНИЯ может подключаться к ПЭВМ через LAN (Ethernet) порт ПК (через сетевую карту). В некоторых моделях прибора БЛОК ФЭУ может быть объединен с БЛОКОМ УПРАВЛЕНИЯ.



Рис 3.1. Блок-схема учебно-моделирующего комплекса ФЯЛ-06.

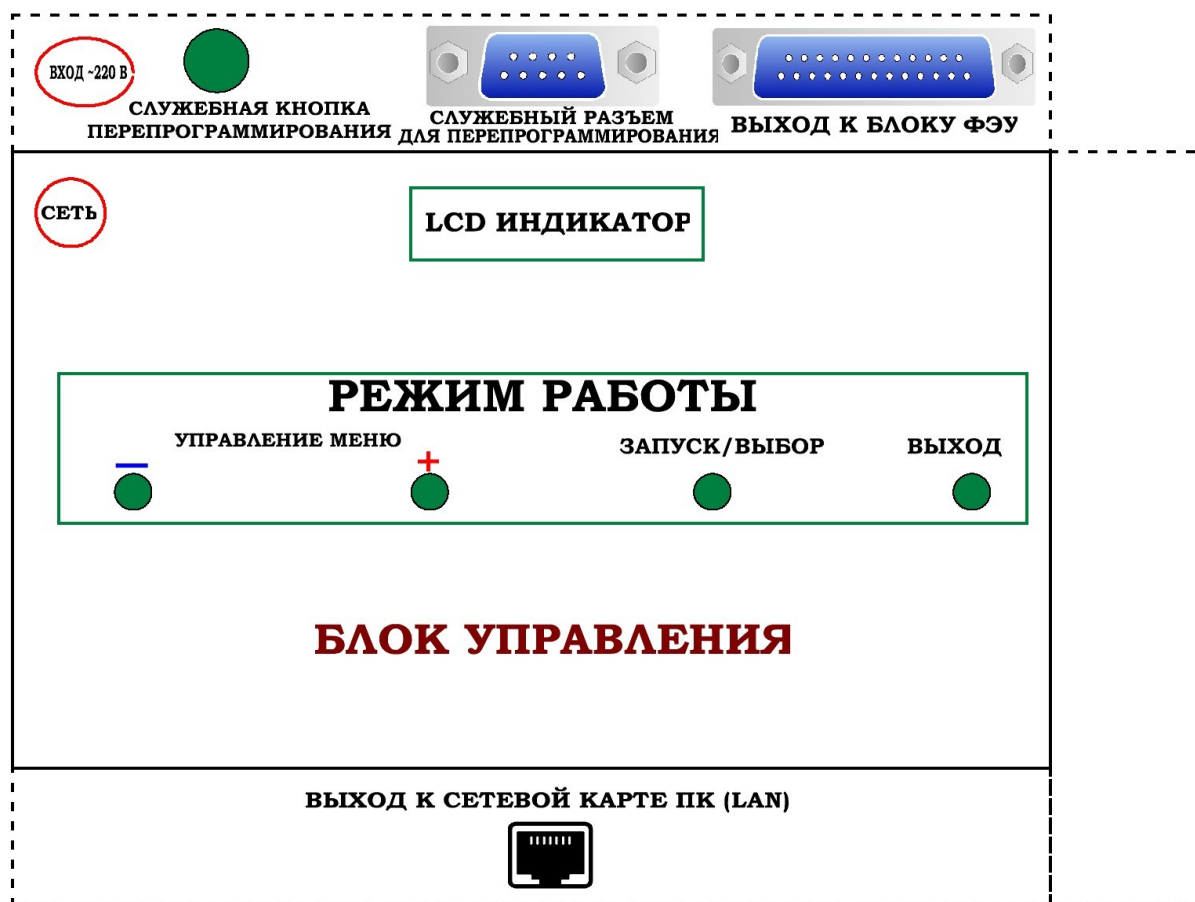


Рис. 3.2. Схема пульта управления экспериментальной установкой ФЯЛ-06.

На верхней панели прибора расположены: кнопка включения (СЕТЬ), LCD ЖКИ индикатор и набор кнопок управления установкой. На задней либо боковой панели расположен 25-PIN разъем для подключения БЛОКА ФЭУ с помощью специального соединительного кабеля из комплекта. На передней панели имеется разъем LAN для соединения прибора с сетевой картой ПК.

Опционально, на задней панели БЛОКА УПРАВЛЕНИЯ может быть расположен 9-PIN разъем для перепрограммирования прибора и кнопка для перепрограммирования (**ВО ВРЕМЯ РАБОТЫ ДОЛЖНА БЫТЬ ОТЖАТА**), которые служат для инженерной отладки прибора во время настройки и не используются в работе.

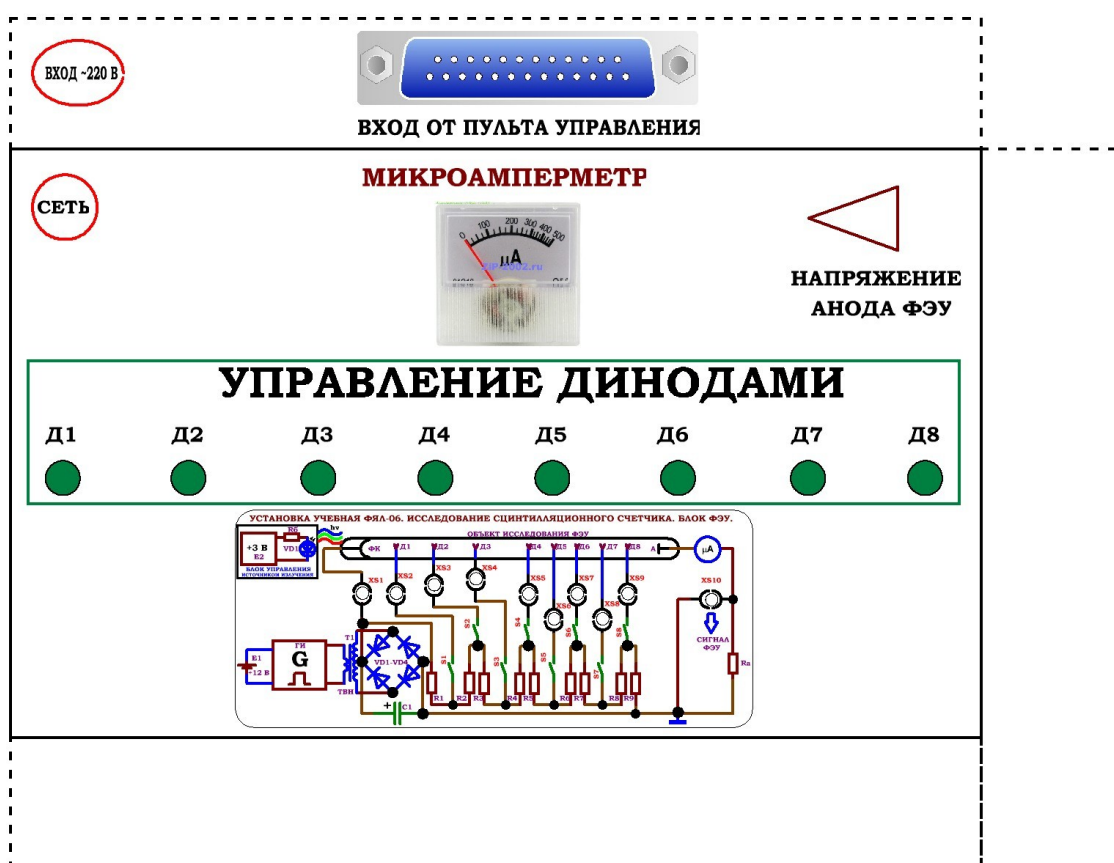


Рис. 3.3. Схема БЛОКА ФЭУ учебной установки УМК ФЯЛ-06.

На верхней панели блока ФЭУ расположены: кнопка включения (СЕТЬ), микроамперметр для измерения тока анода ФЭУ, набора кнопок управления диодами ФЭУ, позволяющие включить либо отключить соответствующий диод, а также выведенные клеммы типа «тюльпан» для измерения напряжения на диодах относительно катода ФЭУ. Ручка «НАПРЯЖЕНИЕ АНОДА ФЭУ» служит для регулировки высокого напряжения на аноде, установленное напряжение на аноде измеряется и выводится на LCD индикатор ПУЛЬТА УПРАВЛЕНИЯ. На задней либо боковой панели расположен 25-PIN разъем для подключения БЛОКА ФЭУ к БЛОКУ УПРАВЛЕНИЯ с помощью специального соединительного кабеля из комплекта.

Внутри БЛОКА ФЭУ расположен RGB светодиод (облучатель), позволяющий получить три монохроматических линии излучения (синяя — 450 нм, зеленая — 540 нм и красная 620 нм). Сзади либо сбоку БЛОКА ФЭУ предусмотрено небольшое смотровое окно, предназначенное для наблюдения за работой облучателя (светодиода). Световые импульсы, воздействуя на фотокатод ФЭУ аналогично световым вспышкам от кристалла сцинтиллятора, вызывают фототок в электрической цепи, который может быть зарегистрирован измерительными приборами.

Программная часть.

Подготовка к работе.

Учебная установка может работать как в автономном (ручном) режиме, без использования ПК, так и в автоматизированном режиме с персональным компьютером.

Для сопряжения работы учебной установки с персональным компьютером используется специально разработанный протокол передачи данных LabVisual, разделяющий байты управления и байты данных. Для визуализации принятых данных служит программа-оболочка LabVisual для ФЯЛ-01. Установка подключается к LAN (Ethernet) порту ПК (сетевая карта) компьютера при помощи специального соединительного кабеля.

Программа LabVisual может успешно работать как на компьютерах под управлением ОС Windows так и на компьютерах под управлением ОС Linux (с соответствующим ПО). При этом достаточно установить драйвера используемой сетевой карты.

В комплекте с лабораторной установкой поставляется ПЭВМ с предустановленным дистрибутивом среды LabVisual 3 и установленным и настроенным программным обеспечением.

После загрузки программной среды (~ 1 мин.) автоматически запуститься программа оболочка LabVisual для работы с экспериментальной установкой. Если программа не запустилась автоматически, на виртуальном рабочем столе следует дважды щелкнуть левой кнопкой мыши на ярлык LabVisual. При этом должно открыться главное окно программы-оболочки LabVisual для работы с экспериментальной установкой (рис. 4.1).

Программа LabVisual имеет интуитивно понятный, дружелюбный пользователю интерфейс, однако при первом включении необходимо выполнить первичную настройку на стороне ПК.

Для установки соединения ПЭВМ с лабораторной установкой через порт LAN (сетевая карта ПК) необходимо предварительно выполнить процедуру настройки сетевой карты компьютера. IP адрес устройства (учебной установки) фиксирован **192.168.0.222**, поэтому для соединения ПК и учебного прибора через LAN необходимо зайти в настройки сетевой карты ПК: ПУСК-НАСТРОЙКА-ПАНЕЛЬ УПРАВЛЕНИЯ-СЕТЕВЫЕ ПОДКЛЮЧЕНИЯ, выбрать ПОДКЛЮЧЕНИЕ ПО ЛОКАЛЬНОЙ СЕТИ, и, нажав правую кнопку мыши, войти в меню "СВОЙСТВА".

Выбрать "Протокол версии Интернета 4 TCP/IPv4 и нажать "СВОЙСТВА". В свойствах сетевого соединения установить:

- 1) Использовать следующий IP адрес: 192.168.0.2 (либо любой другой из подсети 192.168.0.xx)
- 2) Маска подсети 255.255.255.0

После предварительной настройки можно подключать прибор к LAN порту ПЭВМ.

Для проверки соединения включите прибор, настройте параметры сетевой

карты, подключите прибор к LAN порту ПК и выполните на ПК команду ping 192.168.0.222 посредством командной строки.

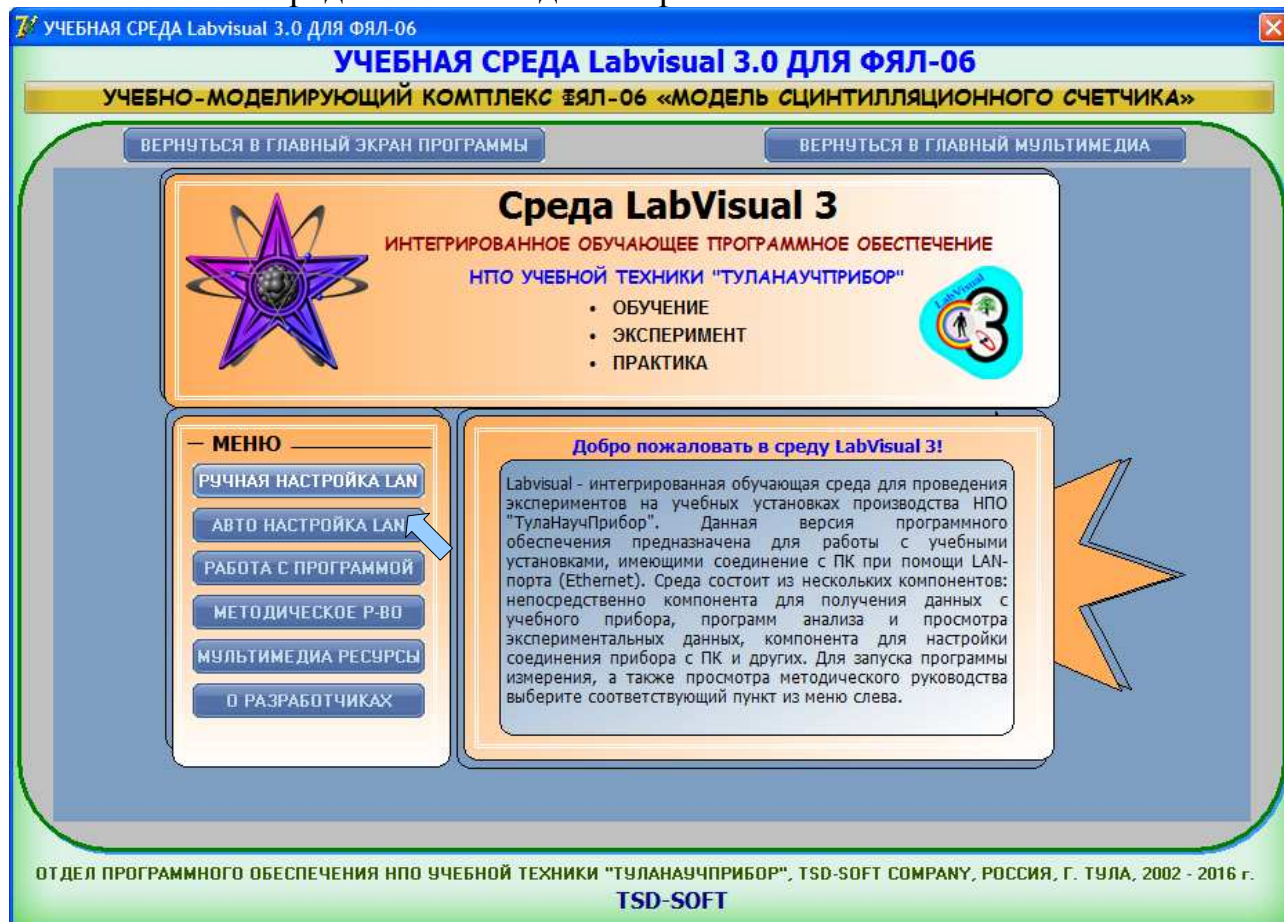


Рис. 4.1. Главное окно программы-оболочки LabVisual для работы с экспериментальной установкой ФЯЛ-06.

В новых версиях программного обеспечения можно выполнить процедуру автонастройки сети, нажав на кнопку «АВТОНАСТРОЙКА LAN».

После соединения прибора с LAN – портом ПК следует запустить подпрограмму работы с прибором, нажав кнопку «РАБОТА С ПРОГРАММОЙ/РАБОТА С ПРИБОРОМ» в интерфейсе LabVisual, необходимая подпрограмма для измерения должна запуститься и автоматически начаться обмен информацией с ПК (измерение текущих параметров) рис. 6.2.

Для ознакомления с программой в отсутствии учебной установки, можно воспользоваться демонстрационным режимом.

Также для работы доступны мультимедийные ресурсы (интерактивный учебник по теме, обучающие программы, фильмы-лекции и т. д.), которые можно открыть, нажав кнопку «МУЛЬТИМЕДИА РЕСУРСЫ» либо открыть файл *.html в браузере с поддержкой FLASH и JAVA.

Для работы java-апплетов необходимо установить среду JRE, а также внести изменения в параметры безопасности среды. Сделать это можно автоматически с помощью установщика среды LabVisual либо вручную.

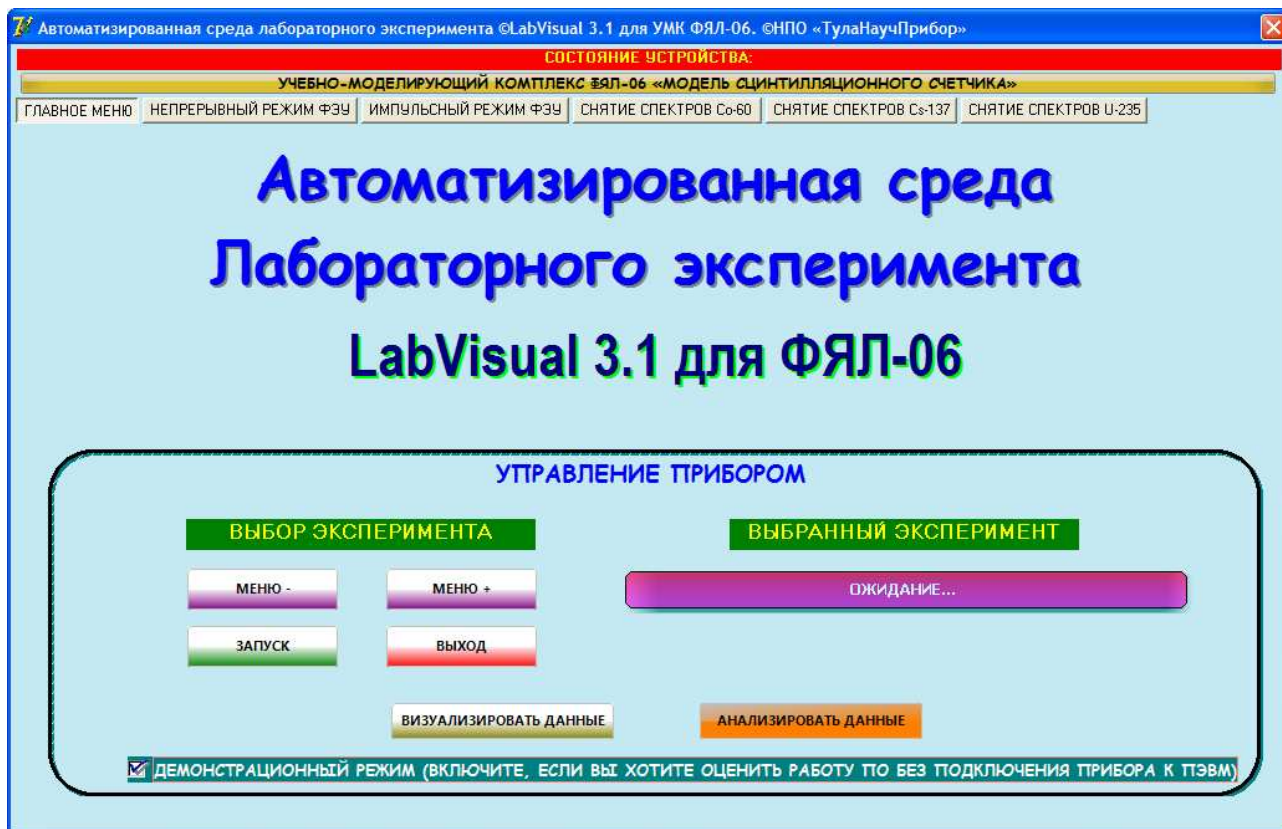


Рис. 4.2. Подпрограмма работы с прибором. Главное меню.

Эксперимент состоит из нескольких частей:

- 1) Исследование работы ФЭУ в непрерывном режиме.
- 2) Исследование работы ФЭУ в импульсном режиме.
- 3) Исследование и обработка γ — спектров.

Управление прибором осуществляется с помощью кнопок управления на ПУЛЬТЕ управления, назначение которых меняется в зависимости от выбранного эксперимента. Прибор также может управляться с помощью программа-оболочки LabVisual, органы управления которой частично дублируют органы управления на БЛОКЕ УПРАВЛЕНИЯ.

Эксперимент -1. Исследование работы ФЭУ в непрерывном режиме.

Подключите БЛОК ФЭУ к БЛОКУ УПРАВЛЕНИЯ и включите все диоды ФЭУ соответствующими кнопками, включите БЛОКИ в СЕТЬ 220 Вольт. Установите напряжение анода 400 — 500 Вольт вращением ручки U_a блока ФЭУ. В главном меню рис. 4.2 программы оболочки LabVisual выберите с помощью кнопок МЕНЮ - , МЕНЮ+ режим «НЕПРЕРЫВНЫЙ РЕЖИМ». Также можно воспользоваться кнопками управления РЕЖИМ РАБОТЫ - + на передней панели БЛОКА УПРАВЛЕНИЯ. Нажмите кнопку «ЗАПУСК/ВХОД». На LCD дисплее БЛОКА УПРАВЛЕНИЯ отображается установленное значение напряжения анода и уровень интенсивности соответствующей линии излучения облучателя (r – красная, g – зеленая, b – синяя). Выбор длины волны в данном режиме осу-

ществляется нажатием кнопки «СТАРТ/ЗАПУСК», установленная активная длина волна отображается в виде большой буквы (R, G или B), остальные облучатели при этом выключены. Для запуска облучателя следует нажать кнопку РЕЖИМ РАБОТЫ + и установить интенсивность излучения кнопками РЕЖИМ РАБОТЫ - +. Т. о., индикация r000 G024 b000 означает что включен зеленый светодиод, который выдает условный уровень освещенности фотокатода 24 Лк. Все данные действия можно выполнить в специальной подпрограмме в среде LabVisual рис. 4.3.

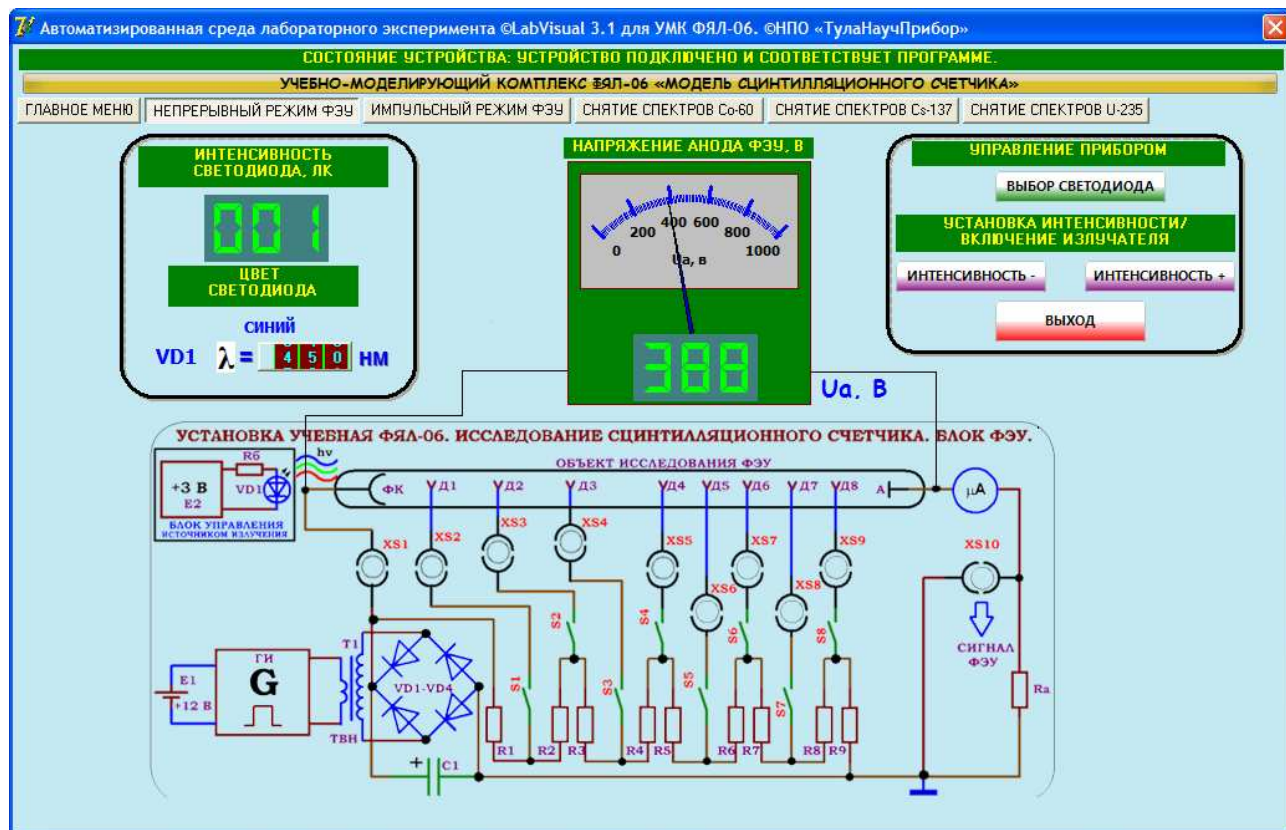


Рис. 4.3. Подпрограмма работы с прибором. Непрерывное облучение фотокатода ФЭУ.

Фототок в цепи можно контролировать с помощью микроамперметра, находящегося на БЛОКЕ ФЭУ. Для выхода из эксперимента нажать кнопку ВЫХОД.

Эксперимент -2. Исследование работы ФЭУ в импульсном режиме.

Перед началом работы в данном эксперимента следует настроить линейный вход (микрофонный) компьютера. При этом следует включить линейный вход LINE IN (либо микрофонный вход MIC) звуковой карты в системе и настроить усиление LINE IN (MIC) средствами операционной системы. Процедура настройки зависит от звуковой карты, в общем случае следует два раза щелкнуть правой кнопкой мыши на значок «ЗВУК», обычно располагающийся в системной области уведомлений и выбрать ПАРАМЕТРЫ → СВОЙСТВА → Устройства Записи (Устройства Воспроизведения). Для некоторых моделей звуковых карт регулировка входов и выходов возможна с помощью про-

грамм, поставляемых в комплекте с драйверами для звуковой карты (например встроенные звуковые карты Realtek). Для исключений эффектов «переусиления» сигналов, установите все регуляторы воспроизведения и записи в системе в среднее положение (30 — 50 %).

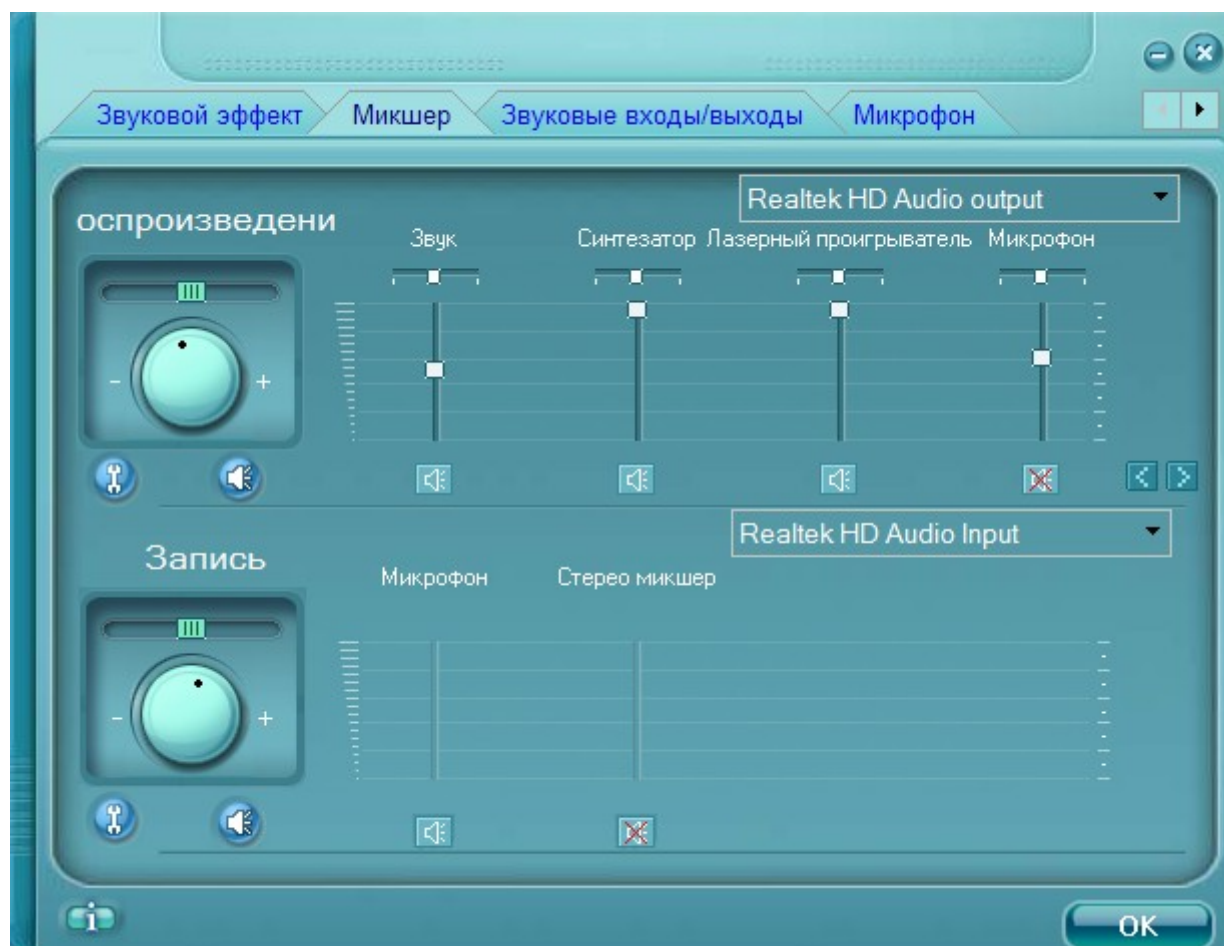


Рис. 4.4. Оптимальные настройки звуковой карты на чипсете RealTek. Обратите внимание, следует отключить «стереомикшер» (встроенный микшер для автоматической программной записи сигналов), в устройствах воспроизведения отключить «МИКРОФОН» и установить все регуляторы воспроизведения и записи в среднее положение. **Обратите внимание, что в настройках на вкладке «МИКРОФОН» следует отключить все эффекты («ЭХО», «ПОДАВЛЕНИЕ ШУМА» и т. д.), иначе возможна некорректная работа компонентов LabVisual.**

Подключите БЛОК ФЭУ к БЛОКУ УПРАВЛЕНИЯ и включите все диоды ФЭУ соответствующими кнопками, включите БЛОКИ в СЕТЬ 220 Вольт. **Установите напряжение анода ФЭУ 0 В (предварительно выключите анод для исключения сбоев от высоковольтных помех).** Соедините линейный LINE IN либо микрофонный MIC вход ПК с клеммой XS10 блока ФЭУ (СИГНАЛ ФЭУ) с помощью соединительного кабеля JACK 3,5 – ТЮЛЬПАН (RCA) из комплекта. Плавно установите напряжение анода ФЭУ порядка 200 - 500 Вольт. В глав-

ном меню рис. 4.2 программы оболочки LabVisual выберите с помощью кнопок МЕНЮ - , МЕНЮ+ режим «ИМПУЛЬСНЫЙ РЕЖИМ». Также можно воспользоваться кнопками управления РЕЖИМ РАБОТЫ - + на передней панели БЛОКА УПРАВЛЕНИЯ. Нажмите кнопку «ЗАПУСК/ВХОД».

На LCD дисплее БЛОКА УПРАВЛЕНИЯ отображается установленное значение напряжения анода и условный период вспышек света, генерируемых облучателем соответствующей линии излучения облучателя (r – красная, g – зеленая, b – синяя). Выбор длины волны в данном режиме осуществляется нажатием кнопки «СТАРТ/ЗАПУСК», установленная активная длина волна отображается в виде большой буквы (R, G или B), остальные облучатели при этом выключены. Для запуска облучателя следует нажать кнопку РЕЖИМ РАБОТЫ + и установить период вспышек излучения кнопками РЕЖИМ РАБОТЫ - +. Т. о., индикация r000 g000 B010 означает что включен синий светодиод, который выдает вспышки света с условным периодом 10 единиц. Точный период в мс либо частота в Гц могут быть определены с помощью встроенного компонента «ОСЦИЛЛОГРАФ».

Все данные действия можно выполнить в специальной подпрограмме в среде LabVisual рис. 4.6.

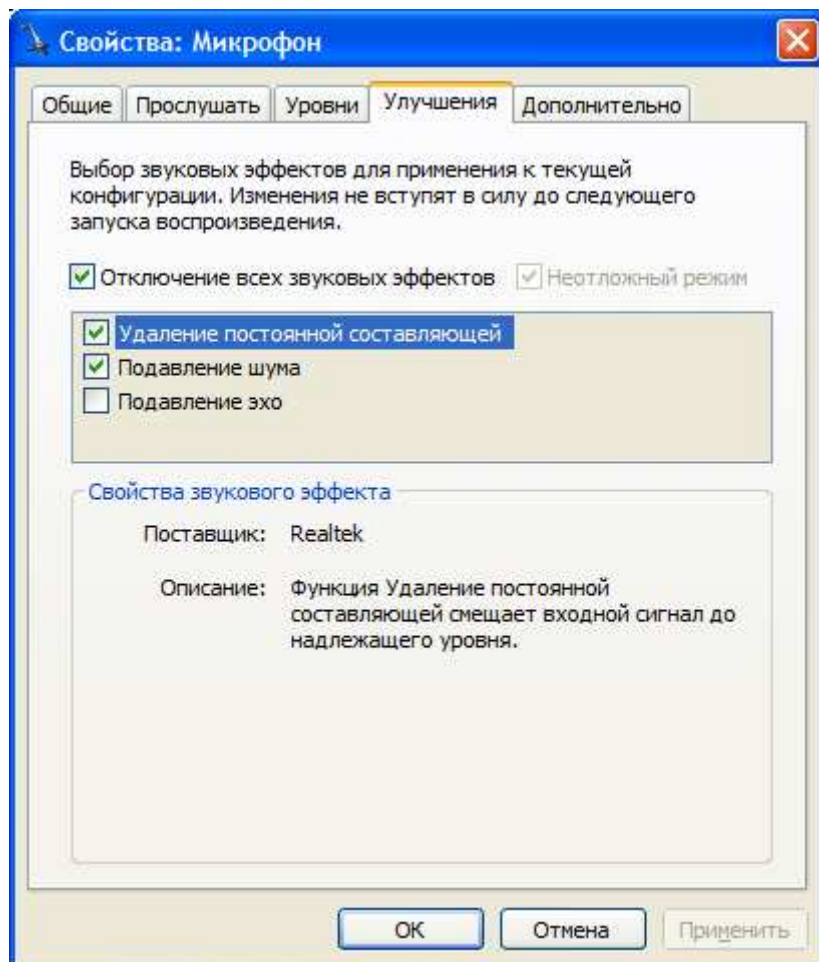


Рис. 4.5. Оптимальные настройки звуковой карты на чипсете RealTek. Обратите внимание, что в настройках на вкладке «МИКРОФОН» следует отключить все эффекты («ЭХО», «ПОДАВЛЕНИЕ ШУМА» и т. д.), иначе возможна некорректная работа компонентов LabVisual.

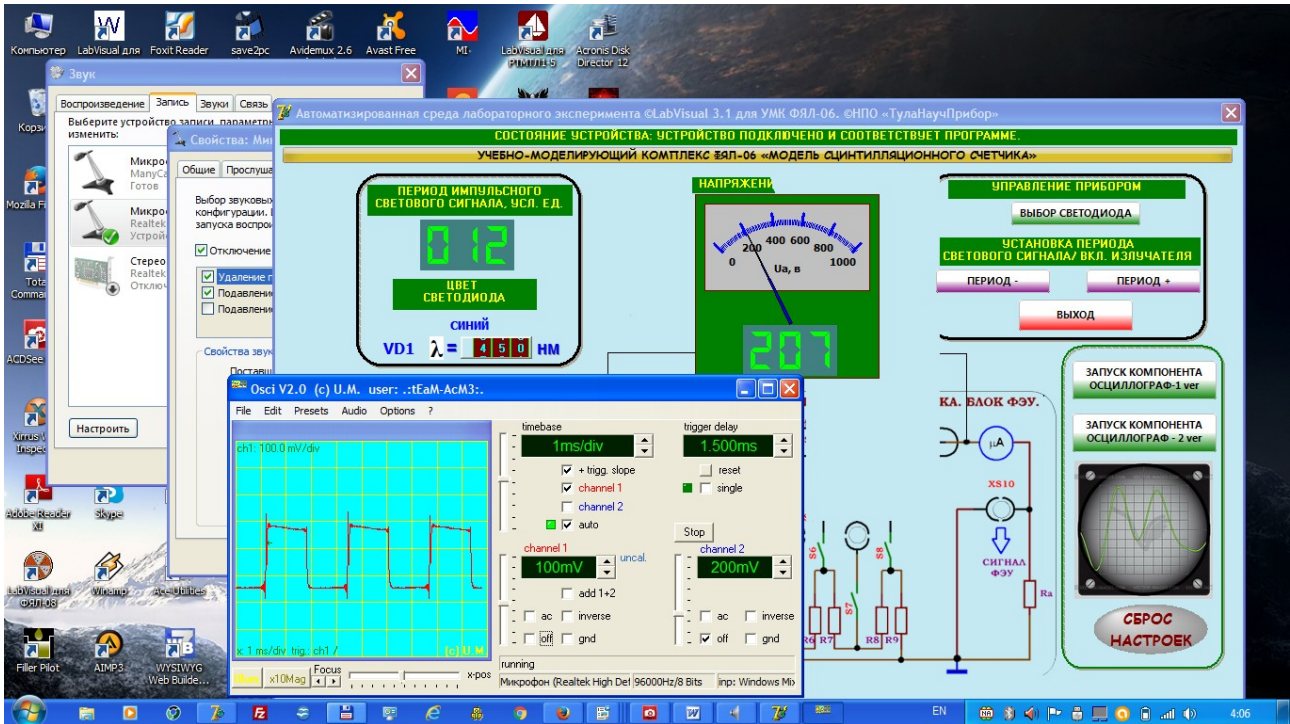


Рис. 4.6. Подпрограмма работы с прибором. Импульсное облучение фотокатода ФЭУ и вид импульсов, снимаемых с фотокатода с помощью компонент-осциллограф.

Для визуальной регистрации сигналов можно также использовать многофункциональный компонент LabVisual Visual Analyser рис. 4.7. ОСЦИЛЛОГРАФ ver 2.

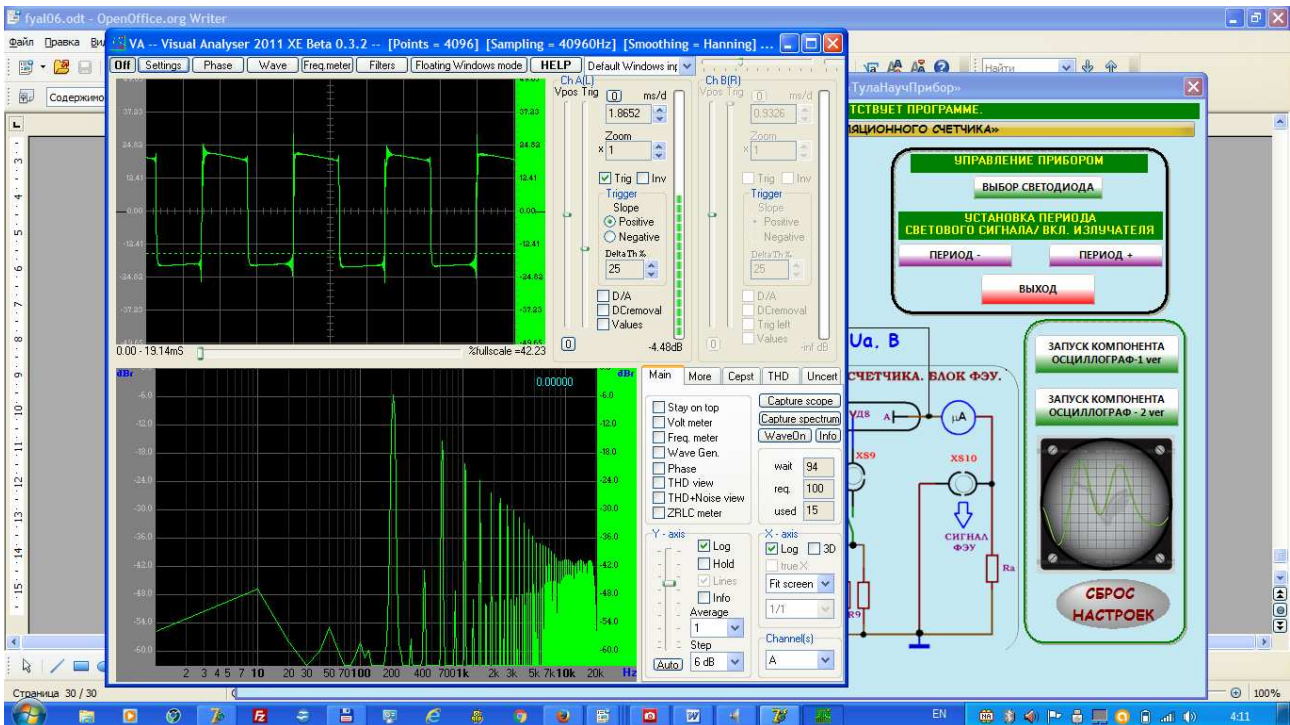


Рис. 4.7. Подпрограмма работы с прибором. Импульсное облучение фотокатода ФЭУ и вид импульсов, снимаемых с фотокатода с помощью компонента LabVisual Visual Analyser.

Для настройки компонента нажмите в главном меню кнопку SETTINGS. В появившемся окне рис. 4.8 перейдите на вкладку «DEVICE» и выберите в качестве устройства входа и выхода вашу звуковую карту (в примере рис. 4.8 используется встроенная звуковая карта RealTek).

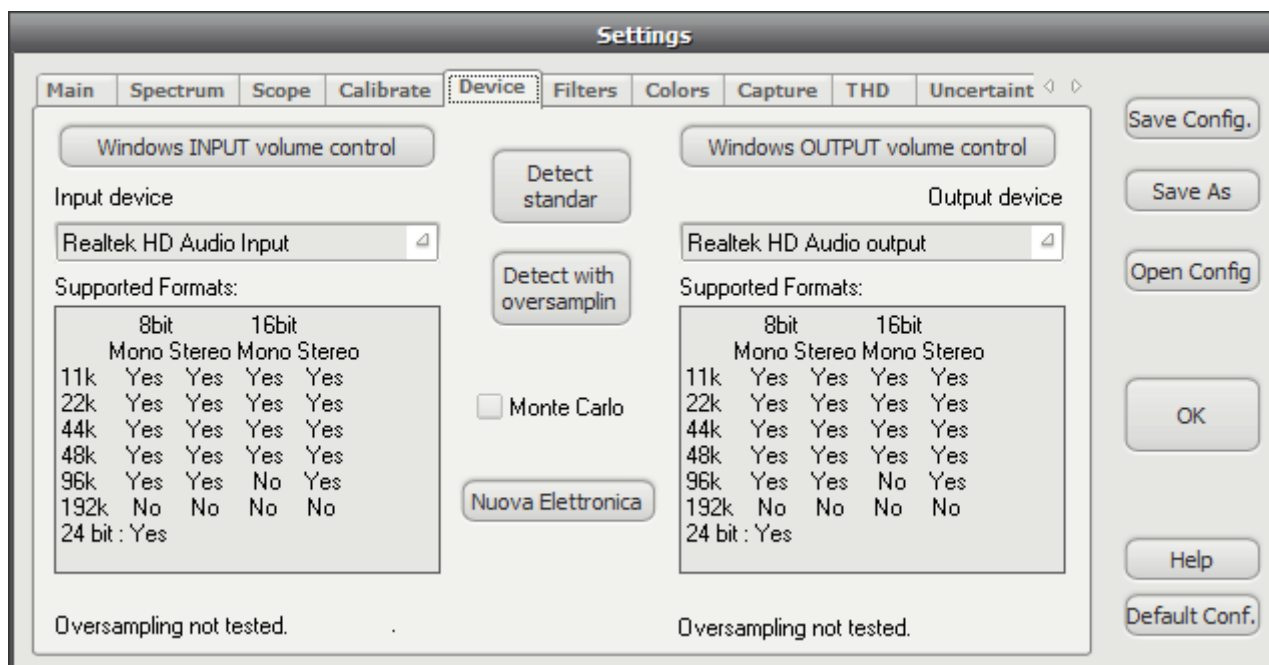


Рис. 4.8. Настройка используемых устройств компонента «LabVisual Visual Analyser»

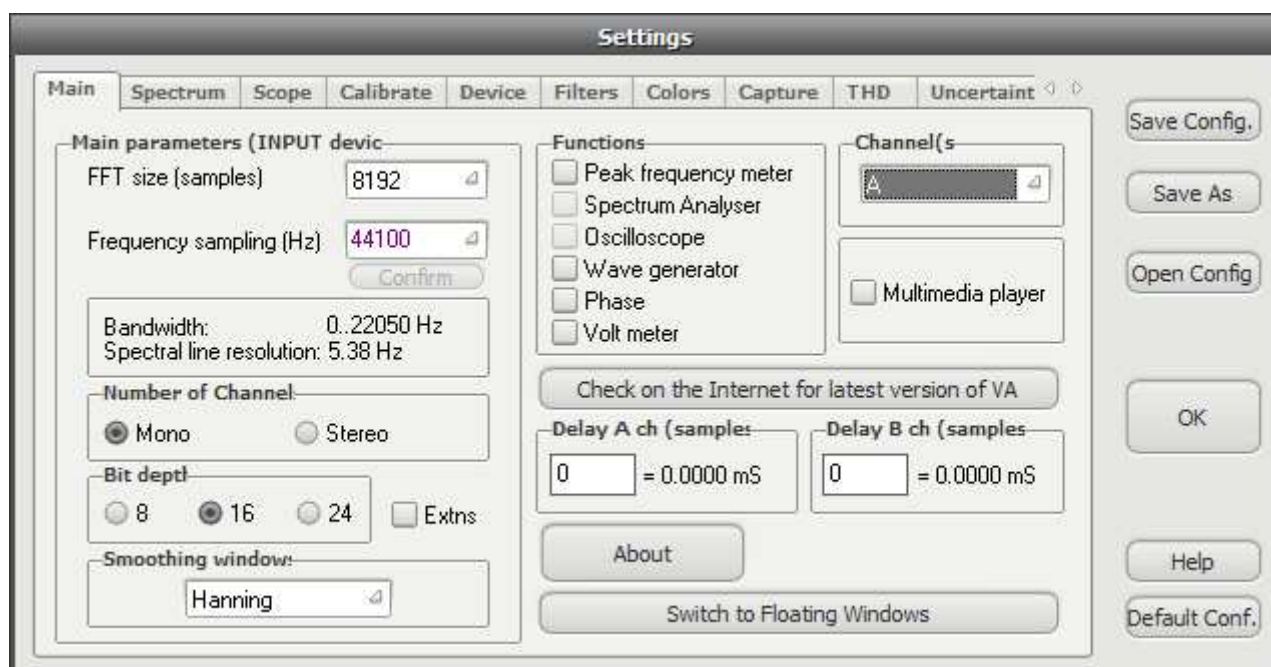


Рис. 4.9. Настройка частоты дискретизации и размера буфера данных компонента «LabVisual Visual Analyser»

Перейдите на вкладку Main рис. 4.9 и установите частоту дискретизации Frequency Sample и размер буфера FFT Size. Наиболее оптимальные значения для большинства устройств Frequency Sample=44100 Hz; FFT Size=8192. Так как вы используете только один канал устройства, установите режим в выпадающем списке Channels A.

Программа запоминает установки и настройки, и восстанавливает их при следующем включении.

Компонент «LabVisual Visual Analyser» может использоваться не только как осциллограф, но и в качестве частотомера, анализатора спектра и нелинейных искажений в области звуковых частот.

Для запуска частотомера нажмите кнопку «Freq Meter» в главном меню компонента. При этом в программе отобразится всплывающее окно с текущими значениями частоты сигнала рис. 4.10. Для точной регистрации частоты установите Resolut.=1,3 Hz, а Power of peak=1 % для слабых сигналов.

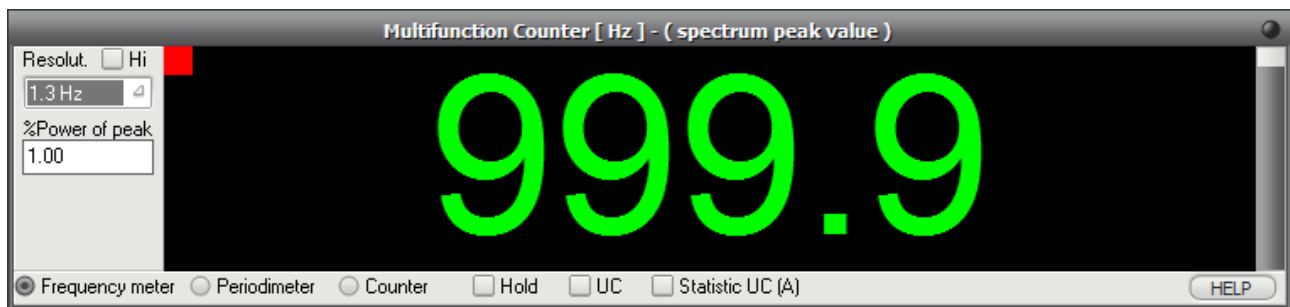


Рис. 4.10. Подпрограмма «ЧАСТОТОМЕР» компонента «LabVisual Visual Analyser»

Эксперимент -3. Исследование сцинтилляционных γ — спектров. Подключите БЛОК ФЭУ к БЛОКУ УПРАВЛЕНИЯ и включите все диоды ФЭУ соответствующими кнопками, включите БЛОКИ в СЕТЬ 220 Вольт. Установите напряжение анода ~200 Вольт вращением ручки U_a блока ФЭУ. В главном меню рис. 4.2 программы оболочки LabVisual выберите с помощью кнопок МЕНЮ - , МЕНЮ+ режим «СПЕКТРАЛЬНЫЙ РЕЖИМ». Также можно воспользоваться кнопками управления РЕЖИМ РАБОТЫ - + на передней панели БЛОКА УПРАВЛЕНИЯ. Нажмите кнопку «ЗАПУСК/ВХОД». На LCD дисплее БЛОКА УПРАВЛЕНИЯ отображается подрежим выбора радиоактивного источника. Обычно для калибровки гамма-спектрометров используются известные калибровочные изотопы, например Co-60 и Cs-137, имеющие характерно выраженные пики полного поглощения (фотопики). Выбрать исследуемый изотоп нажатием кнопок РЕЖИМ РАБОТЫ - + и повторно нажать кнопку «ЗАПУСК». На LCD индикаторе отображается номер канала и количество частиц, зарегистрированное в данном канале амплитудного анализатора. Для снятия спектров в ручном режиме следует сканировать спектр по каналам нажатием кнопок РЕЖИМ РАБОТЫ - + на передней панели ПУЛЬТА УПРАВЛЕНИЯ.

Набор спектра в научных приборах как правило осуществляется в автоматическом режиме в диапазоне 0 — Nmax каналов с разрешением, достаточным для визуализации характерных фотопиков того или иного изотопа.

Для автоматического набора спектра в УМК ФЯЛ-06 следует нажать кнопку РУЧНОЙ/АВТО в программе-оболочке LabVisual. Для движения в сторону возрастания каналов либо для движения в сторону убывания каналов предусмотрена кнопка переключения НАПРАВЛЕНИЕ АВТОСКАНА <<</>> в программе.

Набор спектра осуществляется в течение около 3 — 5 минут для каждого изотопа.

Для прерывания измерения (остановки набора спектра) следует повторно нажать кнопку «РУЧНОЙ/АВТО».

Для полной остановки эксперимента и выхода в подрежим выбора исследуемого изотопа служит кнопка «ВЫХОД». Вернуться к проведению опыта можно нажатием кнопки «ЗАПУСК». Выход в главное меню осуществляется повторным нажатием кнопки ВЫХОД.

При наборе спектра полученные данные автоматически переносятся в текстовое поле программы с возможностью дальнейшего сохранения кнопкой «СОХРАНИТЬ ДАННЫЕ». Можно также установить галочку на пункте «ПОКАЗЫВАТЬ НАБИРАЕМЫЙ СПЕКТР», тогда набираемый спектр от источника будет отображаться в on-line режиме в соответствующем окне программы в виде графика.

Все данные действия можно выполнить в специальной подпрограмме в среде LabVisual рис. 4.11.

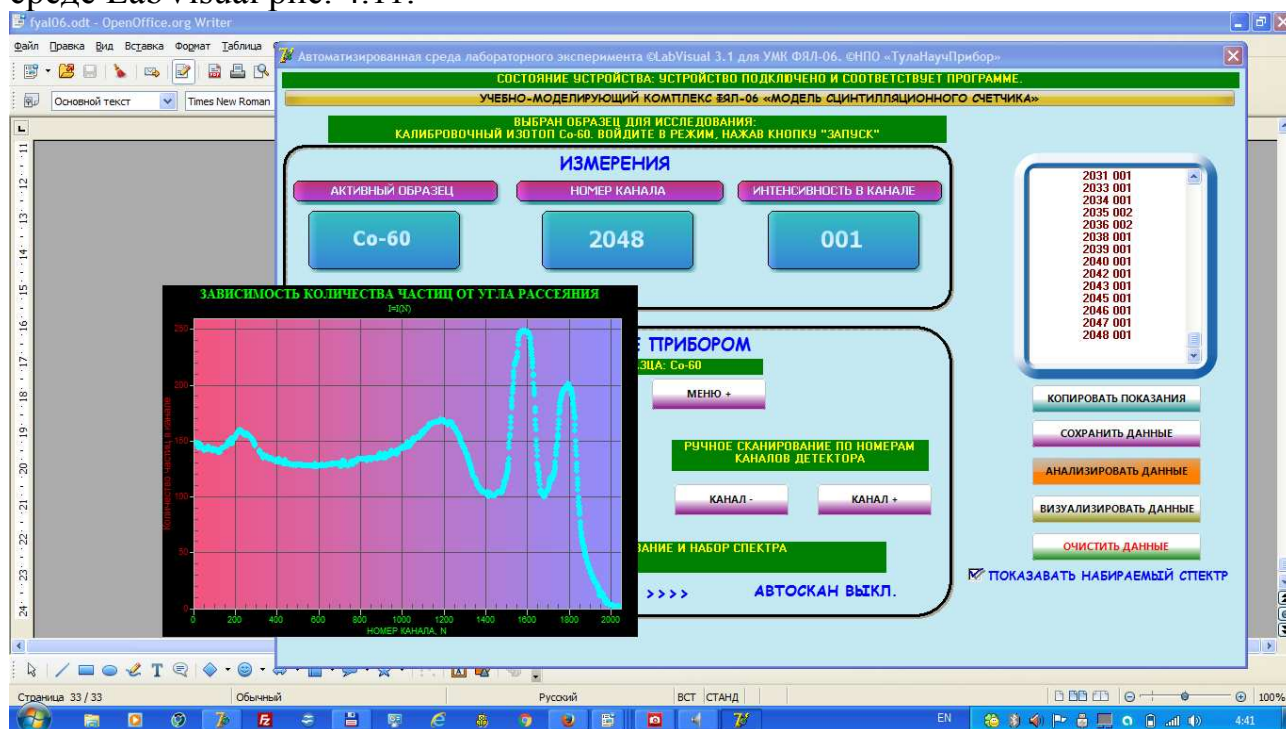


Рис. 4.11. Подпрограмма работы с прибором. Набор гамма-спектра от калибровочного изотопа Co-60. На спектрограмме четко видны два выраженных фотопика.

Для визуализации и последующего анализа полученных спектров в программном комплексе LabVisual служат два компонента – упрощенный компонент LabVisual Data Analyzer рис. 4.12, вызываемый кнопкой «ВИЗУАЛИЗИРОВАТЬ ДАННЫЕ» и компонент с функциями сложного математического анализа для подробного анализа экспериментальных данных и построения графиков LabVisual «MagicPlot» рис. 4.13, вызываемый нажатием кнопки «АНАЛИЗИРОВАТЬ».

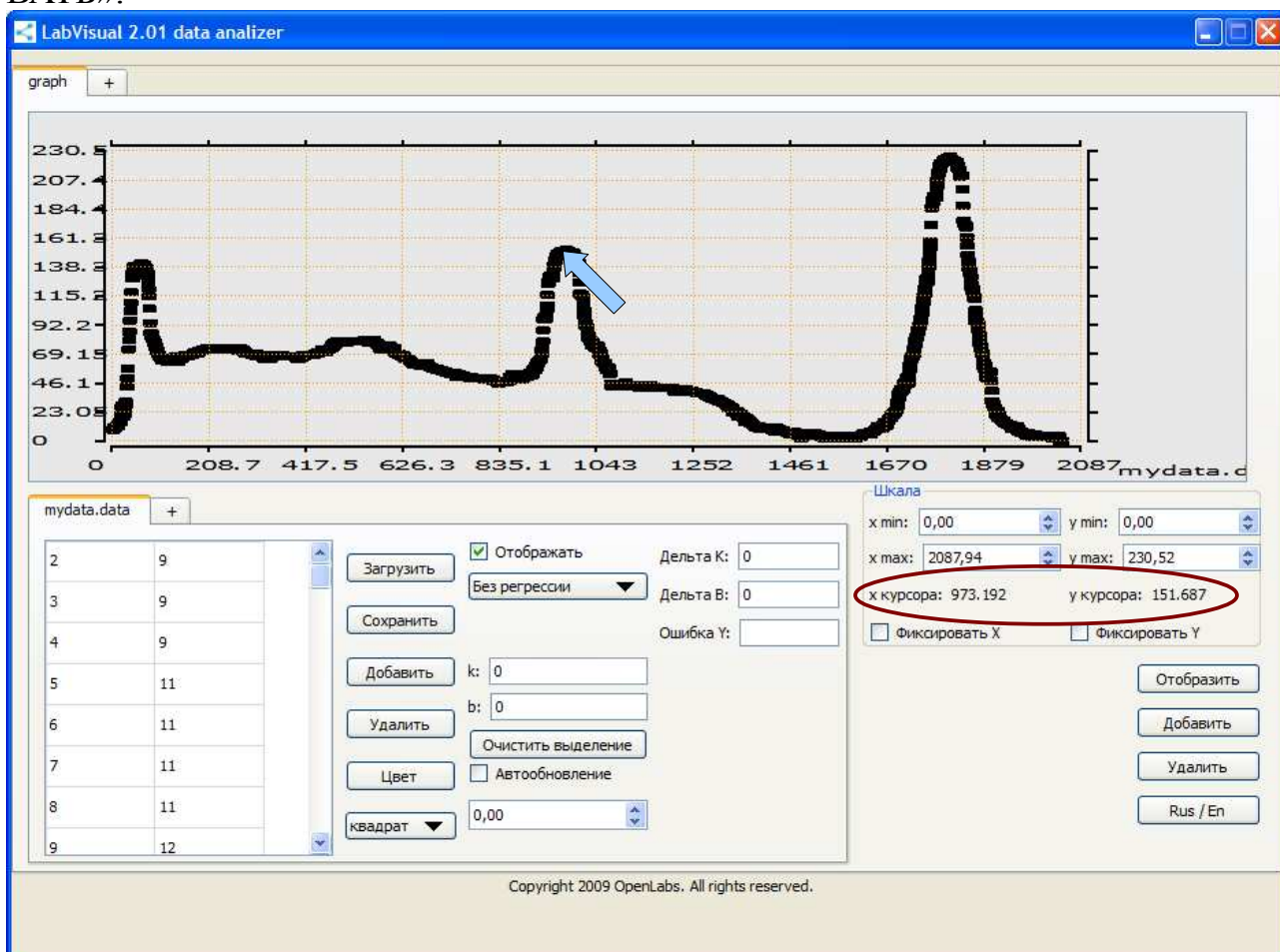


Рис.4.12. Пример работы компонента LabVisual Data Analyzer.

Для загрузки какого-либо файла данных в LabVisual Data Analyzer служит кнопка «ЗАГРУЗИТЬ», для отображения загруженных данных, а также после каких-либо внесенных изменений в график (цвет, символы для отображения и т. д.) следует нажимать кнопку «ОТОБРАЗИТЬ» для перерисовки. Открыв несколько вкладок данных нажатием на вкладку «+» и, загрузив в каждую вкладку данные из сохраненных файлов-данных, можно отобразить на рабочем поле семейство характеристик. Вкладка «+» для графиков служит для создание нескольких рабочих областей графиков, в каждую из которых также можно загрузить данные.

При этом положение центра пика достаточно точно можно найти подводя курсор мыши к вершине необходимого пика и считывая показания в области X

курсора, Y курсора (область выделена на рис. 4.12). В наборе данных, показанных на рис. 4.12 координаты центра пика: X курсора= N канала=973, Y курсора= I интенсивность = 152.

ВНИМАНИЕ! Для работы компонента MagicPlot для анализа данных необходимо установить последнюю версию исполняющей среды Java 7 (Runtime библиотеки виртуальной машины Java).

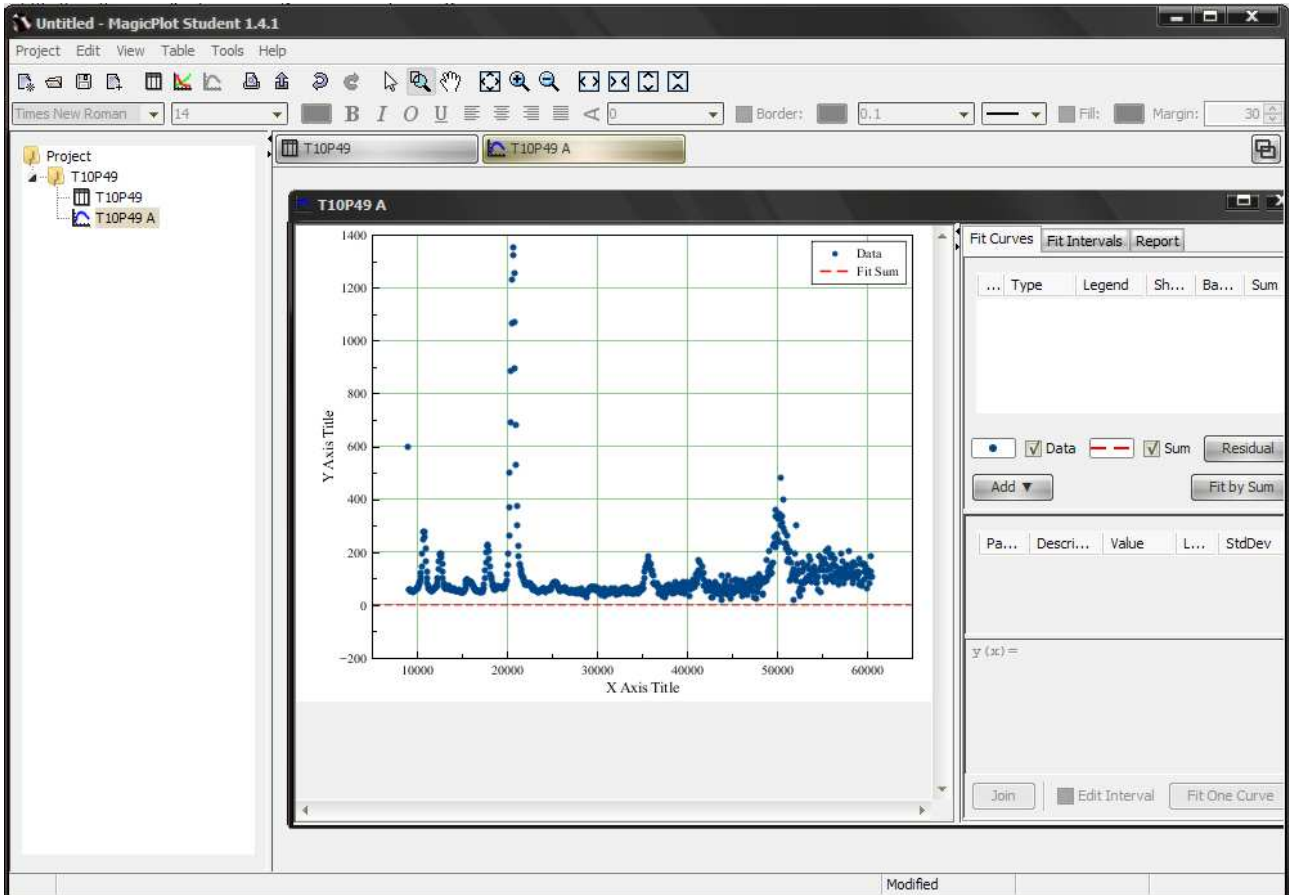


Рис. 4.13. Пример работы компонент MagicPlot для анализа данных, получаемых на лабораторной установке.

Для импорта данных в подпрограмму — анализатор следует воспользоваться командой Project — Import Text Table. При этом откроется стандартное диалоговое окно выбора файла.

Калибровку спектрометра можно провести используя формулу (1.2). Для нашей учебной модели спектрометра будем считать поправку $E\gamma_0$ в формуле приближенно равной нулю ($E\gamma_0 \approx 0$ эВ). Таким образом, определив номер канала $N_{\text{погл}}$, соответствующего максимуму пика полного поглощения $E_{\gamma\text{погл}}$, находим калибровочный коэффициент $K=a$ (энергия квантов в кЭв, приходящихся на канал, в предположении, что характеристика прибора линейна):

$$K = \frac{E_{\gamma\text{погл}}}{N_{\text{погл}}} \quad [\text{кЭв/канал}] \quad (2.1)$$

Подготовка к эксперименту.

1. Перед включением установки в сеть проверить целостность всех соединительных сигнальных и сетевых проводов. Все работы по подключению комплекса к компьютеру следует выполнять только при отключенных от сети приборах. Разобраться с принципиальными блок-схемами опытов, в назначении кнопок, переключателей и ручек прибора.
2. Соединить монитор с системным блоком ПЭВМ, подключить клавиатуру и мышь к системному блоку используя стандартные провода для подключения. Подключить системный блок ПЭВМ и монитор к сети ~220 В.
3. Загрузить операционную систему согласно стандартным процедурам загрузки.
4. При необходимости, настроить компьютер для работы с учебной установкой согласно пункту «ПРОГРАММНАЯ ЧАСТЬ».
5. Запустить программу LabVisual для работы с учебной установкой для данного эксперимента пользуясь ярлыком на рабочем столе либо другим способом, указанным лаборантом.

**Порядок выполнения.
Проведение эксперимента.**

1. Перед включением следует проверить целостность всех соединительных и сетевых проводов устройств.
2. Включить БЛОК ФЭУ в СЕТЬ 220 Вольт и нажмите клавишу СЕТЬ на БЛОКЕ ФЭУ, **не подключая ПУЛЬТ УПРАВЛЕНИЯ.**
3. Провести эксперимент по исследованию зависимости распределения напряжения внутри ФЭУ от номера динода. Для этого следует нажать все кнопки Д1... Д8 управления динодами (подключить все диноды) и подключить мультиметр из комплекта в режиме DC постоянный ток 1000 В к клеммам XS1 – XS10 БЛОКА ФЭУ, при этом, так как измерения проводятся относительно катода, черный щуп СОМ следует подключить к клемме XS1 фотокатод ФЭУ, красный щуп к клемме XS10 – анод ФЭУ.
4. Плавным вращением ручки «НАПРЯЖЕНИЕ АНОДА» БЛОКА ФЭУ установить значение напряжения анода в пределах 600 — 700 В.
5. Подключая красный щуп попеременно к выводам от динодов (клеммам XS2 – XS9) снять зависимость напряжения на диноде U_d от номера динода n .
6. После проведения эксперимента отключить мультиметр от БЛОКА ФЭУ и снять высокое напряжение плавным вращением ручки «НАПРЯЖЕНИЕ АНОДА» против часовой стрелки до нуля.
7. Подключить БЛОК ФЭУ к ПУЛЬТУ УПРАВЛЕНИЯ прилагаемым кабелем 25 PIN (аналог LPT с полной независимой распайкой всех контактов). Подключите прибор к LAN порту ПК (сетевой карте), если вы планируете работу в автоматизированном режиме. Подключите БЛОК УПРАВЛЕНИЯ к сети 220 Вольт и нажмите клавишу СЕТЬ на БЛОКЕ УПРАВЛЕНИЯ.
8. Провести эксперимент по исследованию работы ФЭУ в непрерывном режиме облучения фотокатода.
9. Установите напряжение анода 300 — 400 Вольт вращением ручки U_a блока ФЭУ и наблюдая за показаниями встроенного вольтметра на ЖКИ дисплее прибора. В главном меню рис. 4.2 программы оболочки LabVisual выберите с помощью кнопок МЕНЮ - , МЕНЮ+ режим «НЕПРЕРЫВНЫЙ РЕЖИМ». Также можно воспользоваться кнопками управления РЕЖИМ РАБОТЫ - + на передней панели БЛОКА УПРАВЛЕНИЯ. Нажмите кнопку «ЗАПУСК/ВХОД».
10. Выберите длину волны, которой вы будете облучать фотокатод ФЭУ. В данном режиме выбор длины волны осуществляется нажатием кнопки «СТАРТ/ЗАПУСК», установленная активная длина волны отображается в виде большой буквы (R, G или B), остальные облучатели при этом выключены. Для запуска облучателя следует нажать кнопку РЕЖИМ РАБОТЫ + и установить интенсивность излучения кнопками РЕЖИМ

РАБОТЫ - +. Т. о., индикация r000 G024 b000 означает что включен зеленый светодиод, который выдает условный уровень освещенности фотокатода 24 Лк. Синяя линия спектра имеет длину волны — 450 нм, зеленая — 540 нм и красная 620 нм. Сзади либо сбоку БЛОКА ФЭУ предусмотрено небольшое смотровое окно, предназначенное для наблюдением за работой облучателя (светодиода).

11. При облучении фотокатода ФЭУ светом и всех подключенных в схему ДИНОДАХ ФЭУ при подаче на анод ускоряющего напряжения через цепь потечет фототок, величина которого регистрируется встроенным микроамперметром на БЛОКЕ ФЭУ.
12. Подключая и отключая попеременно различные ускоряющие диноды наблюдать за изменением фототока в цепи ФЭУ. Сделать выводы о влиянии того либо иного динода на величину ФОТОТОКА.
13. Снять вольт-амперную характеристику ФЭУ на данной длине волны при данной освещенности фотокатода, для этого следует плавно вращать ручку НАПРЯЖЕНИЕ АНОДА в диапазоне 0 — 600 В, наблюдая за изменением фототока и построить зависимость $I=I(U)$.
14. Провести данный эксперимент при других освещенностях фотокатода и других длин волн излучения.
15. Построить для каждой длины волны семейство ВАХ ФЭУ.
16. Выйти из данного эксперимента нажатием кнопки ВЫХОД.
17. Перейти в эксперимент по исследованию работы ФЭУ в импульсном режиме.
18. Если это необходимо, предварительно настроить линейный ВХОД ПЭВМ для работы компонента ОСЦИЛЛОГРАФ.
19. **Установите напряжение анода ФЭУ 0 В (предварительно выключите анод для исключения сбоев от высоковольтных помех).** Соедините линейный LINE IN либо микрофонный MIC вход ПК с клеммой XS10 блока ФЭУ (СИГНАЛ ФЭУ) с помощью соединительного кабеля JACK 3,5 – ТЮЛЬПАН (RCA) из комплекта.
20. Плавно установите напряжение анода ФЭУ порядка 200 - 300 Вольт. В главном меню рис. 4.2 программы оболочки LabVisual выберите с помощью кнопок МЕНЮ - , МЕНЮ+ режим «ИМПУЛЬСНЫЙ РЕЖИМ». Также можно воспользоваться кнопками управления РЕЖИМ РАБОТЫ - + на передней панели БЛОКА УПРАВЛЕНИЯ. Нажмите кнопку «ЗАПУСК/ВХОД».
21. На LCD дисплее БЛОКА УПРАВЛЕНИЯ отображается установленное значение напряжения анода и условный период вспышек света, генерируемых облучателем соответствующей линии излучения облучателя (r – красная, g – зеленая, b – синяя). Выбор длины волны в данном режиме осуществляется нажатием кнопки «СТАРТ/ЗАПУСК», установленная активная длина волна отображается в виде большой буквы (R, G или B), остальные облучатели при этом выключены. Для запуска облу-

- чатателя следует нажать кнопку РЕЖИМ РАБОТЫ + и установить период вспышек излучения кнопками РЕЖИМ РАБОТЫ - +. Т. о., индикация r000 g000 B010 означает что включен синий светодиод, который выдает вспышки света с условным периодом 10 единиц.
22. Выбрать длину волны, вспышками света которой вы будете облучать фотокатод ФЭУ в импульсном режиме и установите значение условного периода $\sim 5 - 10$ единиц.
 23. Запустите компонент ОСЦИЛЛОГРАФ в программе-оболочке Lab-Visual для наблюдения импульсов тока на фотокатоде ФЭУ рис. 4.6 — 4.7.
 24. Изменяя ручкой НАПРЯЖЕНИЕ АНОДА значение ускоряющего напряжения, наблюдать за изменением формы и амплитуды импульсов при различном напряжении анода и построить график зависимости амплитуды напряжения с выхода ФЭУ от величины ускоряющего напряжения. При этом встроенный микроамперметр покажет средний фототок в цепи.
 25. Изменяя кнопками управления РЕЖИМ РАБОТЫ - + период (частоту) генерируемых облучателем вспышек света, наблюдать за изменением формы импульсов с фотокатода ФЭУ.
 26. Подключая и отключая различные ускоряющие диоды ФЭУ из цепи питания соответствующими кнопками, наблюдать за изменением амплитуды и формы импульсов с анода ФЭУ.
 27. Провести данные эксперименты на других длинах волн и сделать вывод о чувствительности фотокатода ФЭУ к различным длинам волн излучения.
 28. Выйти из эксперимента нажатием кнопки ВЫХОД.
 29. Выберите в главном меню эксперимент -3 «СПЕКТРАЛЬНЫЙ РЕЖИМ».
 30. В главном меню рис. 4.2 программы оболочки LabVisual выберите с помощью кнопок МЕНЮ - , МЕНЮ+ режим «СПЕКТРАЛЬНЫЙ РЕЖИМ». Также можно воспользоваться кнопками управления РЕЖИМ РАБОТЫ - + на передней панели БЛОКА УПРАВЛЕНИЯ. Нажмите кнопку «ЗАПУСК/ВХОД». На LCD дисплее БЛОКА УПРАВЛЕНИЯ отображается подрежим выбора радиоактивного источника. Обычно для калибровки гамма-спектрометров используются известные калибровочные изотопы, например Co-60 и Cs-137, имеющие характерно выраженные пики полного поглощения (фотопики).
 31. Выбрать изотоп Cs-137 для калибровки амплитудного анализатора прибора нажатием кнопок РЕЖИМ РАБОТЫ - + и повторно нажать кнопку «ЗАПУСК». На LCD индикаторе отображается номер канала и количество частиц, зарегистрированное в данном канале амплитудного анализатора. Для снятия спектров в ручном режиме следует сканировать спектр по каналам нажатием кнопок РЕЖИМ РАБОТЫ - + на

передней панели ПУЛЬТА УПРАВЛЕНИЯ.

32. Набор спектра в научных приборах как правило осуществляется в автоматическом режиме в диапазоне 0 — Nmax каналов с разрешением, достаточным для визуализации характерных фотопиков того или иного изотопа.
33. Для автоматического набора спектра в УМК ФЯЛ-06 следует нажать кнопку РУЧНОЙ/АВТО в программе-оболочке LabVisual. Для движения в сторону возрастания каналов либо для движения в сторону убывания каналов предусмотрена кнопка переключения НАПРАВЛЕНИЕ АВТОСКАНА <<</>> в программе.
34. Набор спектра осуществляется в течение около 3 — 5 минут для каждого изотопа.
35. При наборе спектра в режиме АВТОСКАН полученные данные автоматически переносятся в текстовое поле программы с возможностью дальнейшего сохранения кнопкой «СОХРАНИТЬ ДАННЫЕ». Можно также установить галочку на пункте «ПОКАЗЫВАТЬ НАБИРАЕМЫЙ СПЕКТР», тогда набираемый спектр от источника будет отображаться в on-line режиме в соответствующем окне программы в виде графика.
36. Все данные действия можно выполнить в специальной подпрограмме в среде LabVisual рис. 4.11.
37. Снять спектр калибровочного изотопа Cs-137 нажать кнопку РУЧНОЙ/АВТО в программе либо сканировать спектр вручную с помощью кнопок управления на учебной установке. Ожидать набора спектра в течение порядка 3 минут.
38. Сохранить спектр для последующего анализа кнопкой «СОХРАНИТЬ ДАННЫЕ» и дать осмысленное название файла (например cs137.data).
39. Вызвать компонент LabVisual Data Analyzer рис. 4.12 кнопкой «ВИЗУАЛИЗИРОВАТЬ ДАННЫЕ» и загрузить файл данных в программу (кнопки ЗАГРУЗИТЬ — ОТОБРАЗИТЬ).
40. Сняв спектр образца, определяют номер канала пика полного поглощения. Пик полного поглощения ^{137}Cs соответствует 662 кэВ рис. 2.4, 2.5. Для определения центра пика следует подвести курсор мыши к вершине данного пика и считать показания X (номер канала N) и Y (интенсивность в канале) курсора рис. 4.12 в программе LabVisual Data Analyzer.

41. Определив номер канала $N_{\text{полг}}$, соответствующего максимуму пика полного поглощения, находим калибровочный коэффициент $K=a$ (энергия квантов в кЭв, приходящихся на канал, в предположении, что характеристика прибора линейна и поправка E_{γ_0} — энергия в нулевом канале амплитудного анализатора прибора приближенно равной нулю):

$$K = \frac{662}{N_{\text{полг}}} \text{ [кЭв/канал]}$$

42. Теперь для перевода значения из номера канала в энергию E_{γ} γ -квантов следует использовать простую формулу:

$$E_{\gamma} = K \cdot N$$

где N – номер канала, K — найденный калибровочный коэффициент прибора.

43. Выйти из режима снятия спектра Cs-137 в подрежим выбора спектров нажатием кнопки Выход и выбрать кнопками управления РЕЖИМ РАБОТЫ - + образец Co-60.
44. Провести аналогичные действия пп. 31 — 40 для спектра Co-60.
45. Определить пики полного поглощения для данного образца в условных номерах каналов N и перевести с помощью найденного калибровочного коэффициента эти значения в величины энергий данных линий рис. 2.4, 2.6, 4.12.
46. Сравнить найденные значения с табличными данными.
47. Выйти из режима снятия спектра Cs-137 в подрежим выбора спектров нажатием кнопки Выход и выбрать кнопками управления РЕЖИМ РАБОТЫ - + образец U-235.
48. Повторить действия пп. 31 — 40, 45 — 46 для спектра урана с обогащением изотопом U-235 95-97 %.
49. Сравнить полученные данные с табличными рис. 2.8.
50. По окончании работы отключить установку и блок ФЭУ от сети, поставив переключатель «СЕТЬ» в положение «ВЫКЛ» и вынуть сетевую вилку из розетки.
51. Отключить ПК согласно стандартным процедурам выключения.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Объяснить процессы, происходящие в сцинтилляторе, и перечислить основные параметры сцинтиллятора.
2. На каких двух физических явлениях основана работа фотоэлектронного умножителя?
3. Перечислить основные параметры фотоэлектрических умножителей.
4. Что такое эффективность регистрации детектора? От каких параметров детектора и излучения она зависит? Что такое фоточасть и фотоэффективность?
5. Охарактеризовать особенности регистрации γ -излучения.

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Схемы распада радионуклидов. Энергия и интенсивность излучения. Публикация 38 МКРЗ. М.: Энергоатомиздат, 1987.
2. Курс физики : учеб. пособие для вузов / Т.И. Трофимова. – 17-е изд., стер. – М. : Академия, 2008. – 560 с.
3. Курс общей физики : учеб. пособие для вузов. В 5 кн. / И.В. Савельев. – М. : Астрель; АСТ. Кн. 4. Волны. Оптика : учебник. – 2002. – 256.: ил.
4. Курс общей физики : учеб. пособие для вузов: в 3-х т. / Г.А. Зисман,
5. О.М. Тодес. Т. 3. Оптика. Физика атомов и молекул. Физика атомного ядра и микрочастиц. – 6-е изд., стер. – СПб. : Лань, 2007. – 512 с.

**ДЛЯ СВОБОДНОГО РАСПРОСТРАНЕНИЯ
НПО УЧЕБНОЙ ТЕХНИКИ «ТУЛАНАУЧПРИБОР»**