

На правах рукописи

ПУШКИН Кирилл Николаевич

СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫЙ И ИОНИЗАЦИОННЫЙ ПРОЦЕССЫ В КСЕНОНЕ И В ЕГО
СМЕСЯХ С МЕТАНОМ КАК В РАБОЧЕМ ВЕЩЕСТВЕ ВРЕМЯ-ПРОЕКЦИОННЫХ
КАМЕР.

01.04.01 – приборы и методы экспериментальной физики.

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Автор:

Москва - 2007 г.

Работа выполнена в Московском инженерно-физическом институте (государственном университете), в ФГУП ГНЦ РФ Институте Теоретической и Экспериментальной Физики и университете Васеда (Токио, Япония).

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук, профессор Улин Сергей Евгеньевич

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук Трушкин Николай Иванович,

(ГНЦ РФ “ТРИНИТИ”)

кандидат физико-математических наук Атражев Владимир Михайлович,

(ОИВТ РАН)

Ведущая организация:

ФГУ РНЦ “Курчатовский институт”

Защита состоится “29” мая 2007 г. в “ ” часов на заседании диссертационного совета Д212.130.07 в Московском инженерно-физическом институте (государственном университете) по адресу: 115409, Москва, Каширское шоссе, д.31, тел. 324-84-98, 323-92-56.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МИФИ.

Просим принять участие в работе совета или прислать отзыв в одном экземпляре, заверенный печатью организации.

Автореферат разослан “ ” апреля 2007 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
д.ф.-м.н., профессор

Дмитренко В.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ.

Актуальность темы исследований. Сцинтилляционные процессы в инертных газах изучаются несколько десятков лет. Достаточно хорошо изучены сцинтилляционные процессы как в чистом ксеноне, так и в ксеноне с добавками инертных газов (аргон, гелий и т.д.) [1-5]. В последнее время уделяется большое внимание исследованиям сцинтилляционных и ионизационных процессов в смесях ксенона в связи с созданием современных газообразных время-проекционных детекторов для изучения безнейтринного двойного бета распада, поиска темной материи. В настоящее время является актуальным создание время-проекционного детектора высокого давления для изучения минералогического состава планет. Выбор рабочего вещества для таких типов детектора определяет большую роль их использования. Ксенон, как рабочее вещество детектора, обладает высоким сцинтилляционным выходом по сравнению с другими наиболее часто используемыми благородными газами (аргон и криптон) и коротким временем высвечивания. Следующими основными параметрами, определяющими критерий выбора ксенона в качестве рабочего вещества время-проекционного детектора является: вероятность взаимодействия гамма-излучения с веществом, заряд атомного ядра Z . Известно, что сечение взаимодействия гамма-квантов с атомами сильно зависит от заряда ядра: фотоэффект $\sim Z^5$, комптон-эффект $\sim Z$, процесс образования пар $\sim Z^2$. С этой точки зрения Хе ($Z=54$) является одним из наиболее эффективных поглотителей гамма-излучения. Кроме заряда ядра, важнейшей характеристикой детектирующей среды является ее плотность. Благодаря высокой сжимаемости, газообразный ксенон имеет значительную плотность при относительно невысоком давлении (1 г/см^3 при 70 атм). Все эти параметры являются важнейшими доводами в пользу выбора ксенона в качестве рабочего вещества время-проекционного детектора для регистрации гамма-квантов с энергиями 1-30 МэВ. Такой тип детектора позволит одновременно и с хорошей точностью определить место конверсии гамма-кванта и его энергию. Сцинтилляция в ксеноне от комптон-электрона служит для выработки стартового сигнала, позволяющего по времени дрейфа ионизационных электронов восстановить z -координату точки взаимодействия гамма-кванта с веществом в объеме детектора. Ксенон характеризуется низкой скоростью дрейфа «горячих» электронов, что приводит к значительному размытию электронного облака вследствие диффузии во время его движения к электроду-аноду. Добавки молекулярных газов (H_2 , N_2 , CH_4) значительно увеличивают скорости дрейфа электронов. Среди молекулярных газов широко применяется водород H_2 в качестве ускоряющей добавки электронов в ксеноне. Одним из преимуществ водорода является его легкий метод очистки от различного рода примесей, в том числе и электроотрицательных (O_2^- , F_2^- , и т.д.). Известно, что скорости дрейфа электронов в смесях Хе- CH_4 больше чем в смесях Хе- H_2 . В настоящее время сцинтилляционные и ионизационные процессы в смесях Хе- CH_4 малоизучены. Поэтому, в целом, данная диссертационная работа, посвященная изучению скоростей дрейфа электронов, сцинтилляционного и ионизационного процессов в смесях Хе- CH_4 в широком диапазоне концентраций примеси CH_4 в зависимости от параметра E/N -отношения напряженности электрического поля к количеству атомов, является актуальной для улучшения временных и координатных свойств время-проекционных детекторов.

Цель работы. целью исследования является изучение влияния примеси метана в ксеноне как рабочего вещества время-проекционной камеры на скорости дрейфа электронов, ионизационные и сцинтилляционные процессы, в зависимости от параметра E/N , при давлениях 21 и 26 атм.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Впервые проведены исследования сцинтилляционного и ионизационного выходов в смесях ксенона высокого давления с метаном с помощью ионизационной камеры с перемещающимся катодом. Устройство камеры позволяет поддерживать постоянную напряженность электрического поля на разных расстояниях от катода до анода и дает возможность контролировать чистоту исследуемого газа в процессе проведения эксперимента, чтобы объяснить влияние примесей на поведение сцинтилляционного и ионизационного выходов.
2. Впервые измерен сцинтилляционный выход в смесях ксенона с добавлением 0.05%, 0.2%, 0.4%, 0.6%, 1%, 2% метана в зависимости от параметра E/N .
3. Впервые измерен ионизационный выход в смесях ксенона с добавлением 0.05%, 0.2%, 0.4%, 0.6%, 1%, 5% и 10% метана в зависимости от параметра E/N .
4. Впервые измерены скорости дрейфа электронов в ксеноне с добавлением 0.05%, 0.2%, 0.4%, 0.6%, 1%, 10% метана в зависимости от параметра E/N .
5. Впервые измерены времена сцинтилляционного высвечивания медленной компоненты в ксеноне с добавлением 0.05% метана в зависимости от параметра E/N , при давлении 21 атм.
6. Впервые метод подобия был применен к экспериментальным результатам по измерениям ионизационных выходов в смеси $Xe-CH_4$ для различных концентраций примеси CH_4 . Правило подобия позволяет объединить имеющиеся экспериментальные данные, полученные при различных значениях концентрации метана.

Научная и практическая ценность работы. Результаты этой работы по изучению скоростей дрейфа электронов, сцинтилляционного и ионизационного выходов в смесях $Xe-CH_4$ в широком диапазоне концентраций примеси метана могут быть использованы для выбора оптимального состава $Xe-CH_4$ газовой смеси с целью достижения наилучших рабочих характеристик (высоких скоростей дрейфа электронов, весь собранный электронный заряд, оптимальный сцинтилляционный выход) время-проекционных детекторов, где сцинтилляционный свет исполняет роль триггера. На основе данных экспериментальных результатов может быть сделана оценка временных и координатных характеристик время-проекционного детектора.

Вклад автора. Все оборудование для проведения экспериментальных измерений было создано лично автором или при его непосредственном участии. Основные результаты этой работы были получены лично автором.

На защиту автор выносит следующие положения:

1. Установку, состоящую из ионизационной камеры с кварцевым окном (КУ-1) и с перемещающимся катодом для измерения сцинтилляционного и ионизационного выходов на различных расстояниях между катодом и анодом, включая вакуумно-газовую систему для очистки метана и приготовления смесей ксенона с метаном.
2. Установку, состоящую из ионизационной камеры с MgF_2 -окном для измерения сцинтилляционных и ионизационных выходов, включая вакуумно-газовую систему для очистки метана и приготовления смесей $He-CH_4$.
3. Зависимость сцинтилляционных выходов в смесях ксенона в широком диапазоне концентраций примеси метана (0.05%, 0.2%, 0.4%, 0.6%, 1%, 2%) от параметра E/N .
4. Зависимость ионизационных выходов в смесях ксенона в широком диапазоне концентраций примеси метана (0.05%, 0.2%, 0.4%, 0.6%, 1%, 5% и 10%) от параметра E/N .
5. Зависимость скоростей дрейфа электронов в смесях ксенона с добавлением примеси CH_4 в широком диапазоне концентраций (0.05%, 0.2%, 0.4%, 0.6%, 1%, 10%) от параметра E/N .
6. Зависимость времен сцинтилляционного высвечивания в смеси ксенона с добавлением 0.05% CH_4 от параметра E/N , при давлении 21 атм.
7. Применение метода подбора к экспериментальным результатам по измерению ионизационных выходов в смесях $He-CH_4$ в широком диапазоне концентраций примеси CH_4 . Метод подбора позволяет предсказывать все ионизационные выходы для различных концентраций примеси метана.

Апробация работы. Основные результаты работы были представлены на научных семинарах и международных симпозиумах:

1. Scientific conference, September 2004, Sendai, Japan.
2. IEEE Nuclear Science Symposium, October 16 2004, Rome, Italy;
3. 19th Workshop on Radiation Detectors and Their Uses, KEK Tsukuba, February 2005;
4. 2nd International Workshop on Applications of Rare Gas Xenon to Science and Technology, XeSAT2005, Waseda University, Japan, March 8-10, 2005;
5. IEEE Nuclear Science Symposium, October 29 2006, San-Diego, USA;
6. Научная конференция МИФИ-2007.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 8 печатных научных работ.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения. Общий объем диссертации составляет 121 страница, включая 48 рисунков и 3 таблицы. Список литературы содержит 85 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ.

В первой главе обосновывается актуальность темы исследований. Кратко рассмотрены процессы образования сцинтилляции в благородных газах. Рассмотрены методы подготовки газовых детекторов перед сборкой, а также современные методы вакуумной подготовки детекторов и методы очистки благородных газов от различного рода примесей. Приведен краткий обзор, имеющихся экспериментальных данных по теме диссертационной работы.

Во второй главе подробно описываются две экспериментальные установки, на которых были проведены измерения скоростей дрейфа электронов, сцинтилляционного и ионизационного выходов в смесях Хе-СН₄ при различных концентрациях метана. Приводится описание плоскопараллельной ионизационной камеры с MgF₂ окном в верхнем фланце камеры для регистрации сцинтилляционного света (Установка №1) и описание вакуумно-газовой системы. Ионизационная камера изображена на Рис.1. Внешний диаметр камеры составляет 152 мм и высота 145 мм. Объем камеры составляет ~0,51 л. Камера состоит из катода и анода диаметрами ~70 мм, установленных на керамических стержнях на расстоянии 15 мм друг от друга. Отрицательное высокое напряжение подается непосредственно на катод камеры через металлокерамический гермоввод. Альфа-источник (²⁴¹Am) установлен в середине катода.

Собирающий электрод-анод сделан в форме сетки и состоит из 24 металлических проволок, натянутых на металлическое кольцо с 24 мм. Диаметр проволок и интервалы между ними составляют 0.1 и 1 мм, соответственно, оптическая прозрачность ~90%. В верхней части камеры установлено окно из MgF₂ с диаметром 50 мм и толщиной 10 мм для пропускания коротковолновых фотонов сцинтилляции (~175 нм) в фотоумножитель. Эффективность пропускания MgF₂ окна составляет >50% для фотонов с длиной волны ~121 нм и соответственно больше для фотонов длинноволновой области.

Для регистрации сцинтилляционного света использовался фотоумножитель R6836 (Hamamatsu Photonics) [6]. Типичные характеристики фотоумножителя приведены в таблице 1.

Дано краткое описание вакуумно-газовой системы. Вся система, включая ионизационную камеру были проверены на течь с помощью гелия. Газообразный ксенон очищался от электроотрицательных примесей с помощью барий-титанового высокотемпературного геттера [7]. Вся вакуумно-газовая система, включая ионизационную камеру, прогревалась при температуре ~100 °С и вакуумировалась до остаточного давления 10⁻⁷ торр с помощью турбомоллекулярного насоса, перед процедурой напуска в нее ксенона.

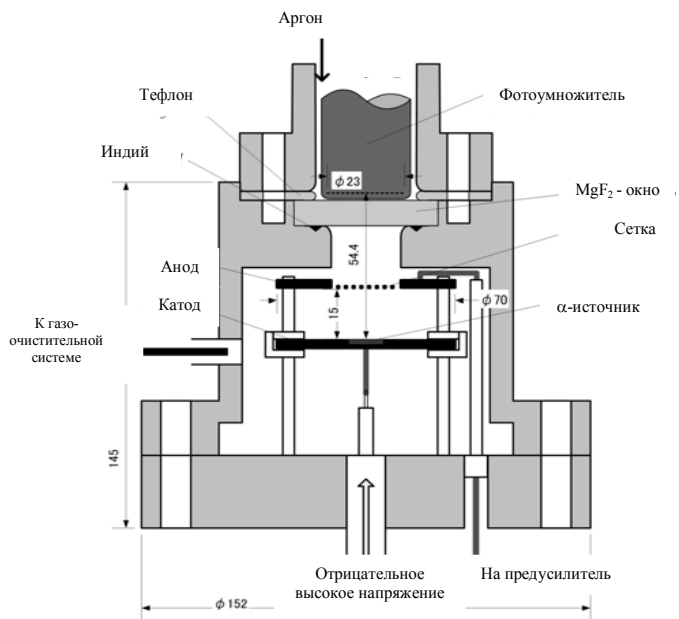


Рис.1. Ионизационная камера для измерений сцинтилляционного и ионизационного выходов.

Таблица 1.

Область спектральной чувствительности, нм	115-320
Максимум спектральной чувствительности, нм	240
Материал фотокатода	Cs-Te
Диаметр фотокатода, мм	23
Материал окна	MgF ₂
Тип диодной системы	Коробчатые диоды
Число диодов	11
Квантовая эффективность фотокатода для вакуумного ультрафиолета с длиной волны 175 нм, %	~12

Приводится описание ионизационной камеры с экранирующей сеткой, включая систему фотоумножителей для регистрации сцинтилляционных времен высвечивания, сцинтилляционного и ионизационного выходов (Установка №2). Ионизационная камера с экранирующей сеткой, включая систему фотоумножителей приведена на Рис.2. Все внутренние элементы камеры изготовлены из нержавеющей стали и керамики. Внутренний диаметр камеры составляет 130 мм и высота 115 мм. Толщина стенки камеры составляет ~3 мм. Верхний фланец камеры имеет стекло из кварца (КУ-1), диаметр и толщина которого составляют 80 мм и 30 мм, соответственно. Прозрачность стекла для коротковолновых фотонов с длиной волны 175 нм, составляет ~65%. Внутренняя часть камеры состоит из катода-электрода, экранирующей сетки и сеточного анода-электрода для пропускания сцинтилляционных фотонов в фотоумножитель. Полезадающие электроды служат для обеспечения равномерного электрического поля внутри рабочего объема камеры. Все электроды крепятся на керамических изоляторах. Существенная особенность этой ионизационной камеры заключается в подвижном катоде-электроде, перемещение которого осуществляется с помощью внешнего электромагнита. Расстояние между анодом-электродом и экранирующей сеткой составляет 0,5 см. Альфа-источник (^{239}Pu) установлен в середине катода. Расстояние между экранирующей сеткой и катодом может меняться от 0,5 см до 5 см. Это позволяет изменять расстояние между электродами и, таким образом, контролировать чистоту исследуемого газа непосредственно в процессе проведения измерений сцинтилляционного и ионизационного выходов.

Для изучения световых выходов в чистом ксеноне и в смеси ксенона с метаном используется система светосбора, состоящая из двух фотоумножителей (См.Рис.2.). Первый фотоумножитель—ФЭУ-39А стоит непосредственно на кварцевом стекле фланца и используется для основной регистрации коротковолновых сцинтилляционных фотонов (175 нм). Типичные характеристики ФЭУ-39А приведены в таблице 2. Второй тип фотоумножителя ФЭУ-143 соединен с кварцевым стеклом фланца через сцинтилляционные волокна для счета фотонов в однофотонном режиме, чтобы измерять времена сцинтилляционного высвечивания в ксеноне и в его смесях с метаном. Типичные характеристики ФЭУ-143 приведены в таблице 3.

Таблица 2.

Область спектральной чувствительности, нм	160-600
Максимум спектральной чувствительности, не менее 45%, нм	215
Материал фотокатода	Sb-Cs
Диаметр фотокатода, мм	28
Материал окна	Кварц (КУ-1)
Тип диодной системы	Ковшеобразные диноды
Число диодов	11
Квантовая эффективность фотокатода для вакуумного ультрафиолета с длиной волны 175 нм, %	~10

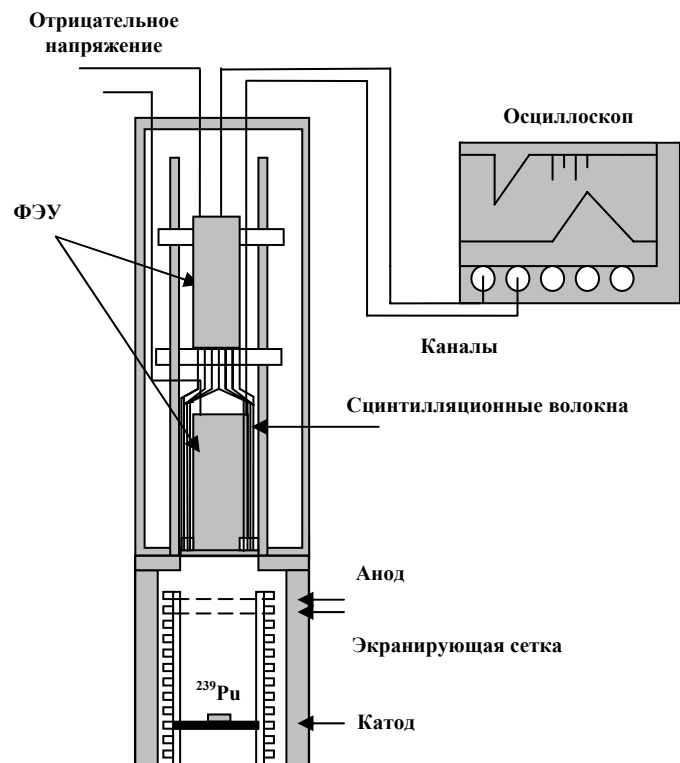


Рис.2. Ионизационная камера с экранирующей сеткой для измерения времен сцинтилляционного высвечивания, сцинтилляционного и ионизационного выходов.

Таблица 3.

Область спектральной чувствительности, нм	300-650
Максимум спектральной чувствительности, нм	380-420
Материал фотокатода	Бищелочной фотокатод
Диаметр фотокатода, мм	40
Тип диодной системы	Линейно-фокусирующая
Длина (макс), мм	125

Приведено описание новой вакуумно-газовой системы для очистки и смешивания метана в этой системе с чистым ксеноном. На Рис. 3. приведен схематический вид газовой системы для очистки метана и его смешивания с ксеноном.

Ионизационная камера (1), вакуумная и газовая система прогревались при температуре $\sim 180^{\circ}\text{C}$ и откачивались с помощью криогенных насосов: активированного угля (8) и цеолита (9). При достижении высокого вакуума в системе, дальнейшая откачка системы проводилась с помощью магнеторазрядного диодного охлаждаемого насоса НМД-0,16-1 (Россия). После проведения откачки, система проверялась на наличие примесей с помощью масс-спектрометра (Residual Gas Analyzer, RGA-200, Stanford research). Вся система была предварительно проверена на течь с помощью гелия. Газообразный ксенон очищался от электроотрицательных примесей по двухступенчатой схеме. На первом этапе очистки использовался высокотемпературный кальциевый геттер, в котором имеется стружка Са, нагретая до температуры 600°C , и фильтр для поглощения кальциевой пыли. На втором этапе очищения ксенон поступал в высокотемпературный титановый геттер.

Очистка метана проводилась путем его циклической прогонки через оксисорб высокого давления (Messer Greisheim) из баллона (3) в баллон (4), которые попеременно смораживались жидким азотом. При создании смеси ксенона с нужной концентрацией метана учитывались объем ионизационной камеры (1), объем линий системы и объем цилиндра (3). Сжимаемость газа также учитывалась для создания нужной концентрации метана в ксеноне. Вакуумметр (2) со шкалой деления (0-1 атм) был использован для определения добавления точного количества метана в чистый ксенон.

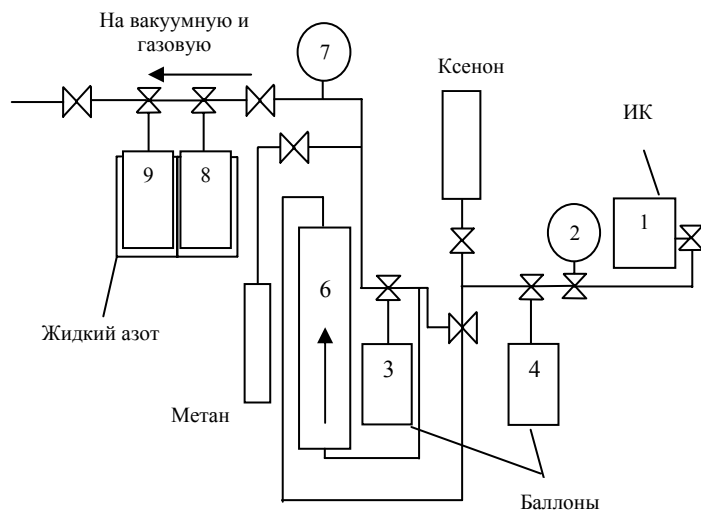


Рис.3. Схематический вид вакуумно-газовой системы для очистки метана и его смешивания с ксеноном.

В третьей главе дано описание разных методик проведения экспериментов по измерениям сцинтилляционного и ионизационного выходов на разных установках (Установка №1 и Установка №2).

Методика проведения измерений на Установке №1 приведена в виде блок-схемы на Рис.4. При проведении экспериментов сигналы с фотоумножителя поступали на зарядочувствительный усилитель 1 (ЗЧУ1) с постоянной времени 3.3 мс, далее на усилитель-формирователь с временем формирования 100 мкс и затем на многоканальный амплитудно-цифровой преобразователь (а.ц.п.).

Ионизационные сигналы измерялись вместе со сцинтилляционными сигналами с помощью зарядо-чувствительного усилителя 2 (ЗЧУ2) с постоянной времени ~3 мс, после чего они поступали на усилитель-формирователь с временем формирования 100 мкс и далее оцифровывались с помощью а.ц.п. Постоянная времени предусилителя выбиралась таким образом, чтобы обеспечить полную регистрацию амплитуд ионизационных сигналов при больших нагрузках. Сигналы оцифровывались с помощью а.ц.п., записывались и хранились на компьютере с их последующей обработкой в Delta Analysis and Technical Graphics ORIGIN. Перед каждым измерением сцинтилляционного и ионизационного выходов проводилась калибровка ЗЧУ1 и ЗЧУ2 с помощью генератора импульсов, которая была учтена при обработке данных. При обработке данных величина сцинтилляционного выхода определялась путем аппроксимации полученных амплитудных распределений сигналов кривой Гаусса и определением затем наиболее вероятного значения.

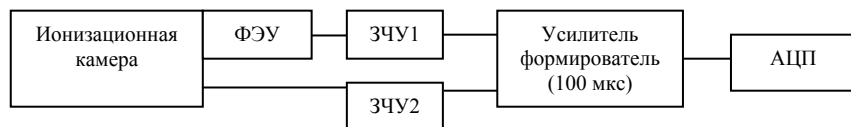


Рис.4. Блок-схема электроники для регистрации сцинтилляционного и ионизационного сигналов.

Методика измерения сцинтилляционного и ионизационного выходов на установке №2 отличается от методики измерений на установке №1. На установке №2, в отличие от установки №1, производилась событийная запись экспериментальных данных при помощи цифрового осциллографа LeCroy-LT344 с максимальной частотой оцифровки 500 МГц. На Рис.5. изображена блок-схема регистрации сцинтилляционного и ионизационного выходов на установке №2.

Выработка триггерного сигнала осуществлялась от сцинтилляционного сигнала, при этом порог срабатывания устанавливался выше собственных шумов ФЭУ. Для контроля стабильности коэффициента усиления ФЭУ использовался калибровочный “зеленый” светодиод. Все данные записывались и хранились в памяти компьютера для их дальнейшей обработки в программе Data Analysis Framework ROOT Software (CERN).

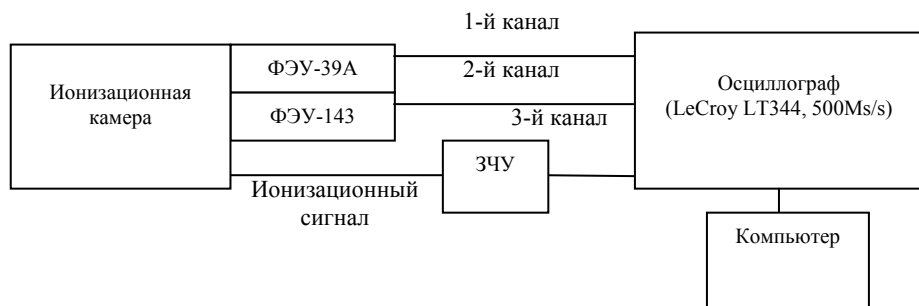


Рис.5. Блок-схема электроники для регистрации сцинтилляционного и ионизационного сигналов.

Сцинтилляционные времена высвечивания в чистом ксеноне и в смеси Хе-СН₄(0.05%) регистрировались в однофотоэлектронном режиме. Первый фотоумножитель ФЭУ-39А регистрировал всю интенсивность световых вспышек в смесях ксенона с метаном, в то время как второй фотоумножитель ФЭУ-143 регистрировал отдельные фотоны, которые и обуславливают одноэлектронные импульсы на выходе ФЭУ. Сигналы с анода каждого фотоумножителя поступали на входы линейных усилителей. С выхода линейных усилителей сигналы поступали на быстрые дискриминаторы. Последние выдавали импульсы определенной формы и амплитуды, которые затем поступали на схему совпадений. Из всей совокупности сигналов, поступающих на схему совпадений, отбирались те, которые приходили с временным сдвигом, меньшим или равным ее разрешающему времени. Задержка между двумя сигналами с ФЭУ-39А и с ФЭУ-143 составляла ~90 нс, соответственно. Далее сигнал запуска поступал из схемы совпадений на осциллограф. Триггер осуществлялся от сигнала приходящего с ФЭУ-143 (однофотоэлектронного сигнала) в “воротах” схемы совпадений, длительность которых составляла ~500 нс.

Четвертая глава посвящена экспериментальным результатам, полученным на Установке №1 и Установке №2. Перед приготовлением смесей Хе-СН₄ были измерены скорости дрейфа электронов в чистом ксеноне. Данные измерения в полном согласии с мировыми данными, полученными в работах Hashimoto et al, Hunter et al, Pack et al и Дмитренко и др.[8, 9]

Скорости дрейфа электронов в смесях Хе-СН₄ измерялись в широком диапазоне концентраций примеси (0.05%-10%) СН₄ в зависимости от параметра E/N – отношения напряженности электрического поля к количеству атомов или молекул. Было показано, что с ростом концентрации примеси метана в ксеноне скорость дрейфа электронов увеличивается при больших электрических полях.

Были измерены на установке №1 зависимости сцинтилляционных выходов в смесях Хе-СН₄ при различных концентрациях метана от параметра E/N, при

давлении газа 26 атм. Зависимость сцинтилляционного выхода в смесях ксенона с метаном от параметра E/N изображена на Рис.6.

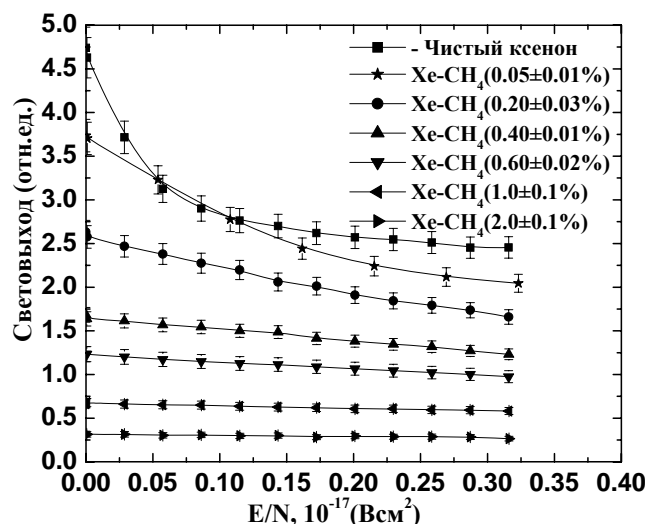


Рис.6. Зависимость сцинтилляционного выхода в смеси ксенона с метаном от параметра E/N .

Из данных результатов видно, что сцинтилляционный свет в чистом ксеноне значительно уменьшается при увеличении интенсивности электрического поля до значения $E/N=0.12 \times 10^{-17} \text{ Всм}^2$. При добавлении 0.05% метана в ксенон сцинтилляционный уменьшается при значении параметра $E/N=0$ на ~20%. При дальнейшем увеличении электрических полей с $E/N=0.05 \times 10^{-17} \text{ Всм}^2$ до $E/N=0.1 \times 10^{-17} \text{ Всм}^2$ величина сцинтилляционного выхода в Xe-CH₄(0.05%) увеличивается до величины сцинтилляционного выхода в чистом ксеноне и далее уменьшается с дальнейшим увеличением электрического поля. При увеличении концентрации CH₄ в ксеноне, сцинтилляционные выходы уменьшаются на всем протяжении электрических полей.

Эксперименты по измерению сцинтилляционного выхода в смеси Xe-CH₄ были повторно проведены с помощью ионизационной камеры с экранирующей сеткой (установка 2) при давлении ксенона $P=21$ атм. Результаты показали, что сцинтилляционные выходы в чистом ксеноне и в смеси Xe-CH₄(0.05%), полученные на установке №2 сошлись с экспериментальными данными по измерению сцинтилляционного света в чистом ксеноне и в смеси Xe-CH₄(0.05%), полученными на установке №1.

На установке №1 были измерены ионизационные выходы в смесях ксенона с метаном в широком диапазоне концентраций примеси CH₄ от параметра E/N , при давлении газа 26 атм. На Рис.7 изображена зависимость ионизационного выхода в чистом ксеноне и в его смесях с метаном от параметра E/N , при давлении $P=26$ атм.

Видно, что ионизационный выход увеличивается в чистом ксеноне с увеличением электрического поля. При добавлении метана в ксенон ионизационный выход значительно уменьшается во всем диапазоне электрических полей. Рост ионизационного сигнала в смесях Xe-CH₄ с увеличением электрического поля слабее, чем для чистого ксенона. Повторные измерения ионизационного выхода в смеси Xe-CH₄, проведенные на установке №2 показали, что ионизационные выходы в чистом ксеноне и в смеси Xe+CH₄(0.05%) сходятся с ионизационными выходами в чистом ксеноне и в его смеси Xe+CH₄(0.05%), измеренными на установке №1.

Были измерены времена сцинтилляционного высвечивания в чистом ксеноне и в его смеси Xe-CH₄(0.05%) на установке №2. На Рис.8 изображена зависимость времен сцинтилляционного высвечивания медленной компоненты в чистом ксеноне и в смеси Xe+CH₄(0.05%) от параметра E/N. Медленная компонента времени высвечивания значительно уменьшается с увеличением электрического поля. Медленная компонента уменьшается от 200 нс до ~80-85 нс при достижении величины электрического поля E/N=0.07×10⁻¹⁷Всм², что соответствует характерному времени жизни триплетного состояния ³Σ_u⁺ [10]. Было обнаружено, что поведение времени высвечивания медленной компоненты в смеси Xe+CH₄(0.05%) отличается от поведения медленной компоненты в чистом ксеноне в зависимости от увеличения электрического поля. В отсутствие электрического поля (E/N=0) и при величине электрического поля E/N=0.01×10⁻¹⁷Всм² времена высвечивания медленной компоненты в смеси Xe+CH₄(0.05%) находятся практически на уровне времен высвечивания в чистом ксеноне при параметре E/N=0, и составляют ~180 нс. При увеличении электрического поля от величины параметра E/N=0.01×10⁻¹⁷Всм² до E/N=0.08×10⁻¹⁷Всм² (низкие электрические поля) времена высвечивания практически не изменяются и составляют ~160-170 нс.

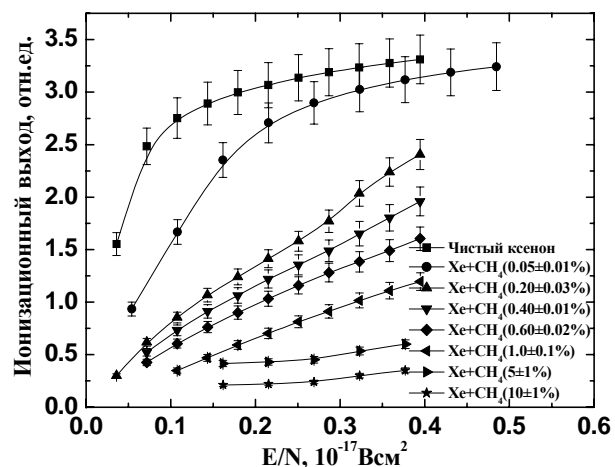


Рис.7. Зависимость ионизационного выхода в чистом ксеноне и в его смесях с метаном от параметра E/N, при давлении P=26 атм.

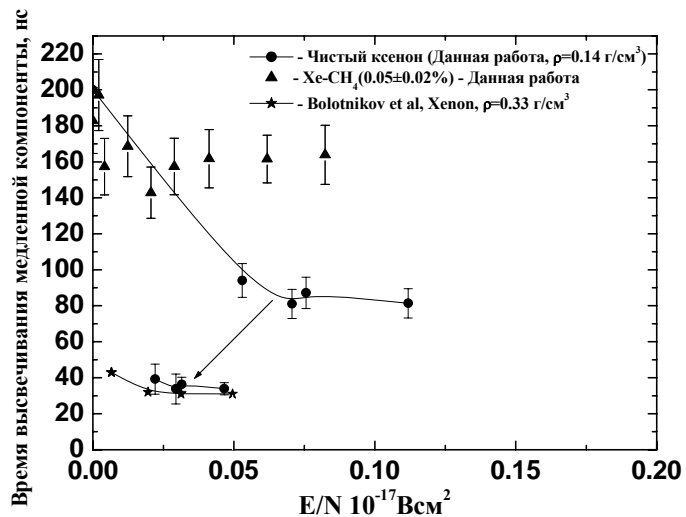


Рис.8. Зависимость времен сцинтиляционного высвечивания медленной компоненты в чистом ксеноне и в смеси Xe+CH₄(0.05%) от параметра E/N.

Пятая глава посвящена анализу экспериментальных данных по измерениям скоростей дрейфа, сцинтиляционного и ионизационного выходов в смесях Xe-CH₄ в широком диапазоне концентраций примеси метана. В чистом ксеноне средняя энергия электронов увеличивается с ростом электрического поля и “горячие” электроны с энергией $\epsilon > 1$ эВ рассеиваются сильно на атомах ксенона с сечением, превышающим минимум Рамзауэра ($\epsilon \sim 0.6$ эВ), приводя таким образом к уменьшению скорости дрейфа электронов и к расплыванию электронного облака на его пути к аноду вследствие диффузии [11]. При добавлении небольшого количества молекулярного газа в чистый ксенон энергия электронов уменьшается при их столкновении с молекулярным газом. Термализованные электроны с энергией $\epsilon < 0.1$ эВ также сильно рассеиваются на атомах ксенона, приводя к уменьшению скоростей дрейфа электронов. В смеси нагрев электронов ослабляется и их средняя энергия становится меньше, чем в чистом Xe при тех же значениях параметра E/N. Поэтому, то же значение средней энергии следует ожидать при больших значениях параметра E/N. С ростом электрического поля средняя энергия электронов растет, и их сечение рассеяния убывает (эффект Рамзауэра). Максимум скорости дрейфа достигается, когда средняя энергия электронов равна энергии минимума Рамзауэра. Было приведено сравнение измерений скоростей дрейфа электронов этой работы для чистого ксенона и смесей Xe-CH₄(1%), Xe-CH₄(10%) с расчетными и экспериментальными данными из других работ [8,9,12]. На Рис. 9 показаны расчетные и экспериментальные скорости дрейфа электронов в газообразном чистом ксеноне и в смесях Xe+1%CH₄ и Xe+10%CH₄ в сравнении с экспериментальными

данными для чистого ксенона и смесей Xe+CH₄(1%) и Xe+CH₄(10%), полученными в этой работе.

Были приведены сравнения скоростей дрейфа электронов для смесей Xe-CH₄(0.4%) и Xe-CH₄(1%) в сравнении со скоростями дрейфа в смесях Xe-H₂(0.46%) и Xe-H₂(1%) из других работ [8,9]. Было показано, что скорость дрейфа электронов в смеси Xe+CH₄(0.4%) превышает скорость дрейфа в смеси Xe+H₂(0.46%) при величине параметра больше $E/N=0.31 \times 10^{-17} \text{ Всм}^2$. Скорость дрейфа электронов в смеси Xe+CH₄(1%) превышает скорость дрейфа в смеси Xe+H₂(1%) при величине параметра больше $E/N=0.44 \times 10^{-17} \text{ Всм}^2$ и продолжает расти линейно с увеличением электрического поля.

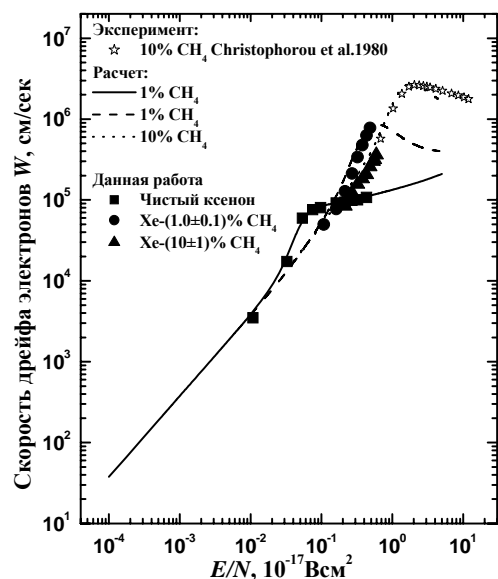
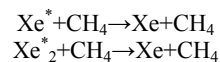


Рис.9. Сравнение экспериментальных скоростей дрейфа электронов в чистом ксеноне и для смесей Xe+CH₄(1%) и Xe+CH₄(10%) из данной работы с расчетными и экспериментальными скоростями дрейфа электронов в газообразном чистом ксеноне и в смесях Xe+1%CH₄ и Xe+10%CH₄ из работ [8,9,12].

Сцинтилляционный выход в чистом ксеноне уменьшается с ростом электрического поля вследствие уменьшения рекомбинационных процессов. С ростом концентрации примеси CH₄ в ксеноне сцинтилляционный выход уменьшается по отношению к сцинтилляции в чистом ксеноне на всем протяжении электрических полей. Данный эффект связан с процессами тушения атомов Xe* и молекул ксенона (димеров) Xe*₂ молекулами метана CH₄.



Высвечивание сцинтилляции от рекомбинационных процессов имеет отношение к так называемой “начальной” рекомбинации, которая происходит в очень плотных сгустках ионизации, поля внутри которых столь велики, что небольшое внешнее поле не вызывает эмиссии электронов из этих сгустков и они быстро рекомбинируют с ионами. Следующий, более медленный процесс, протекает вне плотных ионизационных сгустков и носит название объемной рекомбинации. Этот тип рекомбинации относится к электронам, которые в результате Броуновского движения покидают ионизационные треки и, теряя среднюю энергию, становятся холодными на значительном расстоянии от первоначального трека, где Кулоновское взаимодействие незначительно. Сцинтилляция от рекомбинационных процессов имеет большой вклад в триплетное состояние $^3\Sigma_u^+$ и небольшой вклад в синглетное состояние $^1\Sigma_u^+$ [13]. В чистом ксеноне электроны становятся “горячими” при значениях параметра $E/N=(0.04-0.06)\times 10^{-17}\text{Всм}^2$, что приводит к уменьшению объемной рекомбинации и, в свою очередь к уменьшению времен сцинтилляционного высвечивания.

В смеси Хе-СН₄(0.05%) времена высвечивания практически не изменяются на всем протяжении электрических полей ($E/N=(0-0.08)\times 10^{-17}\text{Всм}^2$). Данный эффект вероятнее всего объясняется тем, что электроны при этих значениях поля (низкие поля) являются “холодными”, т.к. они теряют среднюю энергию при столкновениях с молекулами метана и, таким образом рекомбинируют с ионами, вызывая тем самым задержку времен высвечивания. Средняя энергия электронов в смеси Хе+СН₄(0.05%) уменьшается при их столкновениях с молекулами метана и равна средней энергии электронов в чистом ксеноне в отсутствие электрического поля ($E/N=0$).

Поскольку α -частицы создают плотные ионизационные треки, в них идет сильная рекомбинация и слабые электрические поля не имеют большого влияния на эмиссию электронов из этих треков. Ионизационный выход в чистом ксеноне увеличивается с ростом электрического поля, но в малых полях заряд теряется вследствие сильной рекомбинации. С увеличением концентрации метана в ксеноне электроны становятся “холодными” поскольку их средняя энергия уменьшается при столкновении с молекулами метана, что увеличивает рекомбинационные процессы.

К измерениям ионизационных выходов был применен метод подобия, полученный в работе [8,9], позволяющий объединить все данные, полученные при различных концентрациях примеси СН₄. На Рис.10 изображена зависимость ионизационного выхода в смесях ксенона с метаном от приведенного параметра $E/N\sqrt{\chi(1-\chi)}$. Метод подобия позволяет предсказывать все ионизационные выходы для различных концентраций примеси метана.

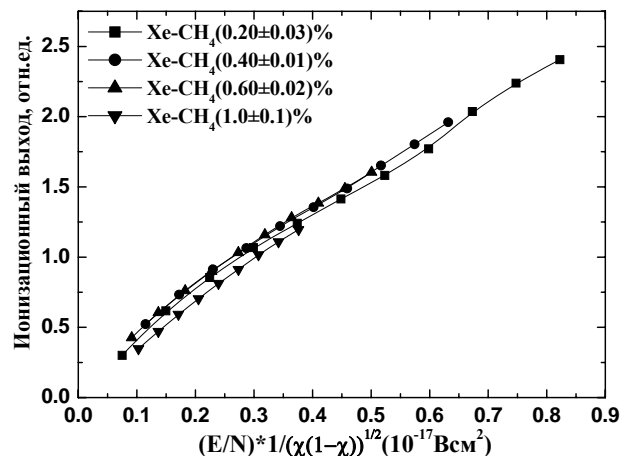


Рис.10. Зависимость ионизационного выхода в смесях ксенона с метаном от приведенного параметра $E/N \cdot \sqrt{\chi(1-\chi)}$

ВЫВОДЫ.

Основные результаты, полученные в диссертационной работе, состоят в следующем:

1. Были созданы установки, состоящие из ионизационных камер для изучения сцинтилляционного и ионизационного процессов в смесях Xe-CH₄, включая вакуумно-газовые системы для подготовки этих смесей.
2. Измерены скорости дрейфа электронов в смесях Xe-CH₄ в широком диапазоне концентраций примеси метана (0.05%-10%) в зависимости от параметра E/N.
3. Измерен сцинтилляционный выход в смеси ксенона с метаном в широком диапазоне концентраций примеси метана (0.05%-2%) в зависимости от параметра E/N. При добавлении 5% метана в ксенон сцинтилляционный свет исчез.
4. Измерены времена сцинтилляционного высвечивания в чистом ксеноне и в смеси Xe-CH₄(0.05%) в зависимости от параметра E/N.
5. Измерен ионизационный выход в смесях Xe-CH₄ в широком диапазоне концентраций примеси метана (0.05%-10%) в зависимости от параметра E/N.
6. Был применен метод подобия к измерениям ионизационных выходов, позволяющий предсказывать все ионизационные выходы для различных концентраций примеси CH₄.

Основные результаты диссертации представлены на 6 конференциях и опубликованы в следующих работах:

1. K.N. Pushkin, N. Hasebe, S. Kobayashi, C. Tezuka, M. Mimura, T. Hosojima, M.-N. Kobayashi, T. Doke, M. Miyajima, T. Miyachi, E. Shibamura, S.E. Ulin, V.V. Dmitrenko, "Scintillation yield in high pressure xenon and xenon doped with methane," IEEE Conference Record, 2004 IEEE V.1, 16-22 Oct. 2004, p.550-553.
2. K.N. Pushkin, N. Hasebe, C. Tezuka, S. Kobayashi, M. Mimura, T. Hosojima, M.-N. Kobayashi, T. Doke, M. Miyajima, T. Miyachi, E. Shibamura, V.V. Dmitrenko, S.E. Ulin. "Study of luminescence output in high pressure xenon with additive methane". Proceedings of the 2nd International Workshop on Applications of Rare Gas Xenon to Science and Technology (XeSAT2005), Waseda University, 2005, p.19.
3. C. Tezuka, N. Hasebe, T. Doke, M. Miyajima, T. Miyachi, M.N. Kobayashi, S. Kobayashi, M. Mimura, T. Hosojima, E. Shibamura, K.N. Pushkin, A. Ishizuka. "Effects of gas doping in xenon for developing high-pressure Xe-TPC" Proceedings of the 2nd International Workshop on Applications of Rare Gas Xenon to Science and Technology (XeSAT2005), Waseda University, 2005, p.64.
4. K. N. Pushkin, N. Hasebe, C. Tezuka, S. Kobayashi, M. Mimura, T. Hosojima, M. -N. Kobayashi, T. Doke, M. Miyajima, T. Miyachi, V. V. Dmitrenko, S. E. Ulin and E. Shibamura "Study of luminescence yield in High Pressure Xenon and xenon with additive methane", KEK Proceedings, 19th Workshop Radiation Detectors and their Uses, Tsukuba, p.209. February 1-3 2005.
5. S. Kobayashi, N. Hasebe, T. Hosojima, T. Igarashi, M.-N. Kobayashi, M. Mimura, T. Miyachi, M. Miyajima, K.N. Pushkin, H. Sakaba, C. Tezuka, T. Doke and E. Shibamura, "New generation gamma-ray camera for planetary science application: High pressure xenon time-projection chamber," Advances in Space Research, V. 37, Issue 1, 2006, P. 28-33.
6. К.Н. Пушкин, N. Hasebe, C. Tezuka, S. Kobayashi, M. Mimura, T. Hosojima, T. Doke, M. Miyajima, T. Miyachi, E. Shibamura, B.B. Дмитренко, С.Е. Улин. "Сцинтилляционный и ионизационный выходы в ксеноне и в смеси ксенона с метаном". Приборы и Техника Эксперимента. №4, стр. 45-49, 2006.
7. K.N. Pushkin, D.Y. Akimov, A.A. Burenkov, V.V. Dmitrenko, A.G. Kovalenko, V.N. Lebedenko, I.S. Kuznetsov, V.N. Stekhanov, C. Tezuka, S.E. Ulin, Z.M. Uteshev, K.F. Vlasik, "Scintillation light, ionization yield and scintillation decay times in high-pressure xenon and xenon-methane", IEEE Conference Record, San-Diego, USA, October 29, 2006.
8. К.Н. Пушкин, Д.Ю. Акимов, А.А. Буренков, В.В. Дмитренко, А.Г. Коваленко, В.Н. Лебеденко, И.С. Кузнецов, В.Н. Стеханов, С. Tezuka, С.Е. Улин, З.М. Утешев, К.Ф. Власик. "Времена сцинтилляционного высвечивания, сцинтилляционный и ионизационный выходы в смеси ксенона с метаном," Научная сессия МИФИ-2007, Сборник научных трудов, том 7, с.47-48, Москва, 2007 г.

Список цитируемой литературы.

- [1] Northrop J.A., Nobles R.A., IRE Trans. Nucl. Sci., 1956, p.19.
- [2] Northrop J.A. and Gursky J.M., Nuclear Instruments, 1958, v.3, p.207-212.
- [3] Takahashi T., Kubota S. and Doke T., Phys. Lett., 1966, v.23, №5, p.321.
- [4] Долгошеин Б.А., Лебедеенко В.Н., Рогожин А.М., Родионов Б.У., Шувалова Е.Н. ЖЭТФ. 1969. Т. 56. № 4. С. 1152.
- [5] Бутиков Ю.А., Долгошеин Б.А., Лебедеенко В.Н., Рогожин А.М., Родионов Б. У. ЖЭТФ. 1969. Т. 57. № 4 С. 42.
- [6] www.hamamatsu.com
- [7] Miyajima M., Masuda K., Hitachi A., et al., Nucl. Instr. and Methods, 1976, v.134, p.403.
- [8] Атражев В.М., Дмитренко В.В., Чернышева И.В., Теплофизика высоких температур, 2004, Т.42, №4, С.506-515.
- [9] Атражев В.М., Дмитренко В.В., Чернышева И.В., Письма в ЖТФ, 2003, Т.30, вып.7.
- [10] Suzuki M., Ruan (Gen) J., and Kubota S., Nucl. Instr. and Methods, v.192, 1982, p.565-574.
- [11] Bowe J.C., Phys. Rev., 1960, v.117, №6, p.1411-1415.
- [12] Christophorou L.G., Maxey D.V., McCorkle D.L., Carter J.G. Nuclear Instr. and Methods, 1980, V.171, P.491.
- [13] Suzuki M., Ruan (Gen) J., and Kubota S., Nucl. Instr. and Methods, 1982, v. 192, p.623-625.