

На правах рукописи

КАЩУК Юрий Анатольевич

**Сцинтилляционные спектрометры  
нейтронного и гамма излучения для  
диагностики термоядерной плазмы**

01.04.08 - физика плазмы

01.04.01 - приборы и методы экспериментальной физики

*Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук*

Москва - 2007

Работа выполнена в Государственном научном центре Российской Федерации  
«ТРОИЦКИЙ ИНСТИТУТ ИННОВАЦИОННЫХ И ТЕРМОЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ»

Научные руководители: доктор физико-математических наук  
Красильников Анатолий Витальевич  
доктор физико-математических наук  
Трыков Лев Алексеевич

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук  
Готт Юрий Владимирович  
кандидат физико-математических наук  
Салахутдинов Гаяр Харисович

Ведущая организация: Институт общей физики РАН им. А.М. Прохорова

Защита состоится 18 апреля 2007 года в 15 часов на заседании  
специализированного диссертационного совета Д 212.130.05 Московского  
инженерно-физического института (государственного университета) по адресу:  
Москва, Каширское шоссе, д.31, корпус «К», аудитория К-608, тел.323-91-67,  
324-84-98.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МИФИ.

Автореферат разослан « 16 » марта 2007 г.

Отзывы на автореферат просим направить по адресу: Москва, Каширское  
шоссе, д.31

Ученый секретарь диссертационного совета,  
доктор физико-математических наук, профессор



И.В. Евсеев

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность работы

ИТЭР (ITER – International Thermonuclear Experimental Reactor) - международный проект по созданию термоядерного экспериментального реактора на базе токамака. В соответствии с заключенным в 2006 году Соглашением, в сооружении ИТЭР принимают участие Европейский Союз, Россия, США, Япония, Китай, Южная Корея и Индия. Первый в мире экспериментальный термоядерный реактор будет построен на площадке ядерного центра СЕА (Кадараш, Франция). Научные исследования на ИТЭРе позволят продемонстрировать мировой общественности техническую осуществимость термоядерной реакции, как надежного и безопасного источника энергии с неисчерпаемыми запасами топлива.

Проект токамака-реактора ИТЭР предусматривает работу с длинным импульсом тока плазмы, с вытянутым по вертикали сечением плазменного шнура и дивертором. В номинальном индуктивном режиме работы предполагается достичь мощности термоядерных реакции 400 МВт при длительности импульса «горения» более 300 секунд. При этом в плазму может быть введено до 100 МВт мощности дополнительного нагрева.

Для управления режимами работы токамака-реактора ИТЭР необходимы эффективные средства диагностики высокотемпературной плазмы. Одним из важнейших методов диагностики являются нейтронные измерения, которые должны обеспечить:

- измерение динамики абсолютного нейтронного выхода реактора во всех режимах его работы,
- измерение выделяемой термоядерной мощности,
- измерение пространственных распределений ионной температуры, источника термоядерных нейтронов и  $\alpha$ -частиц.

Разрабатываемый в настоящее время комплекс нейтронной диагностики ИТЭР состоит из следующих подсистем: радиальный и вертикальный многоканальные нейтронные коллиматоры; внутренний, внешний и диверторный мониторы нейтронного выхода, нейтронно-активационная система и группа нейтронных спектрометров. Прототипы всех подсистем нейтронной диагностики ИТЭР в той или иной мере прошли успешное тестирование в экспериментах на больших токамаках TFTR(США), JET(Англия) и JT-60U(Япония) и показали принципиальную возможность решения поставленных задач. Однако в случае ИТЭР дизайн нейтронной диагностики должен быть приспособлен к длительному (квазистационарному) режиму работы в условиях интенсивных нейтронных потоков (которые на порядок выше максимально достигнутой плотности потока нейтронов на токамаке JET вовремя экспериментов с d-t плазмой). Высокие потоки нейтронов и длительные импульсы ИТЭР приводят к тому, что детекторы будут облучены значительными интегральными флюенсами быстрых нейтронов – более чем  $10^4$  раз превышающим их величины в экспериментах на современных больших токамаках. Поэтому, в конструкции токамака-реактора предусмотрена радиационная защита в виде массивных железо-водных бланкетов и толстой вакуумной камеры. Такая конструкция оказывает существенное влияние на выбор нейтронных детекторов для измерений в многоканальных нейтронных коллиматорах, погрешность определения

термоядерной мощности установки и на пространственное разрешение при измерении профиля нейтронного источника.

Особое место в нейтронной диагностике занимают методы измерения энергетических спектров нейтронного и гамма излучения, поскольку с их помощью могут быть определены такие параметры плазмы как:

- полный нейтронный выход;
- термоядерная мощность и плотность мощности;
- ионная температура плазмы;
- отношение плотностей трития и дейтерия в центре плазменного шнура;
- пространственное и энергетическое распределение удерживаемых в  $\alpha$ -частиц.

Среди существующих нейтронных детекторов, используемых для диагностики горячей плазмы, выделяются органические сцинтилляционные детекторы, поскольку они могут работать как компактные спектрометры термоядерных нейтронов. Их применение в радиальном и вертикальном многоканальных нейтронных коллиматорах ИТЭР обеспечит измерение ионной температуры плазмы, пространственного распределения быстрых дейтронов и тритонов, профиля полоидального вращения плазмы. В отличие от других типов компактных спектрометров термоядерных нейтронов (на основе кремниевых и алмазных ППД), органические сцинтилляторы обеспечивают широкий динамический диапазон измерений (за счет быстрого времени высвечивания и возможности существенного изменения эффективности детекторов) и возможность одновременного измерения спектров d-d и d-t нейтронов. Однако до сих пор при реализации спектрометрии нейтронного излучения с помощью органических сцинтилляторов не учитывались особенности измерений термоядерных спектров и были не реализованы все преимущества данного метода. Поэтому исследования в области спектрометрии нейтронного и гамма излучения термоядерной плазмы, создание новых приборов и методов измерений, несомненно, являются актуальной научной задачей.

**Цель настоящей работы** – разработка и практическое применение сцинтилляционных спектрометров нейтронного и гамма излучения для исследования характеристик термоядерной плазмы токамаков.

**Научная новизна работы** заключается в следующем:

- развиты экспериментальные методы спектрометрии ионизирующего излучения высокотемпературной термоядерной плазмы в экспериментах на токамаках;
- обоснованы и разработаны методологические основы спектрометрии термоядерных нейтронов при помощи детекторов с органическими сцинтилляторами, включая разработку алгоритмов восстановления энергетических спектров термоядерных нейтронов и создание соответствующего комплекса программного обеспечения;
- получены экспериментальные данные, подтверждающие природу ионизирующего излучения в экспериментах на токамаке FTU, что позволило перейти от качественного описания к созданию адекватных моделей формирования пучка убегающих электронов;
- получены экспериментальные результаты, подтверждающие эффективность сценариев ионно-циклотронного нагрева плазмы в d-t экспериментах на токамаке JET;

- разработаны и впервые применены в экспериментальных исследованиях характеристик ионизирующего излучения термоядерной плазмы токамака нейтронные детекторы на базе органических сцинтилляторов с цифровым разделением сигналов по форме импульса;

**Практическая значимость** полученных результатов диссертационной работы заключается в следующем:

- созданные спектрометры нейтронного и гамма излучений нашли практическое применение в экспериментальных исследованиях характеристик термоядерной плазмы практически на всех крупных токамаках мира – TORE SUPRA, JET, JT-60U и FTU;
- изученные особенности спектрометрии термоядерных нейтронов спектрометрами с органическими сцинтилляторами позволяют определять их предельные характеристики, необходимые для создания нейтронной диагностики ИТЭР;
- система цифрового разделения сигналов нейтронного и гамма излучений при регистрации сцинтилляционными детекторами позволяет повысить полезную скорость счета, обеспечивая тем самым лучшее временное разрешение и уменьшая погрешность измерений;

**Положения, выносимые на защиту:**

- разработанный сцинтилляционный спектрометр с кристаллом стибьбена обеспечивает энергетическое разрешение 150 кэВ при регистрации d-d нейтронов и 300 кэВ при регистрации d-t нейтронов, что обеспечивает измерение ионной температуры плазмы в диапазоне выше 4 кэВ и удовлетворяет требованиям, предъявляемым к спектрометрам термоядерных нейтронов ИТЭР;
- разработан метод определения ионной температуры и ее погрешности из энергетического спектра термоядерных нейтронов, измеренного спектрометром с органическим сцинтиллятором, удовлетворяющий требованиям ИТЭР по временному разрешению и погрешности измерений;
- сцинтилляционные спектрометры на основе кристалла стибьбена с разделением сигналов нейтронного и гамма излучения по форме импульса обеспечивают скорость счета не менее, чем  $\sim 1,5 \times 10^5$  импульсов/сек, что является предельной величиной для схем с аналоговой обработкой сигналов;
- в экспериментах с ионно-циклотронным нагревом d-t плазмы сцинтилляционный спектрометр с кристаллом стибьбена позволяет надежно измерять “эффективную ионную температуру” при различных мощностях и фазировках ВЧ волн;
- созданная система цифрового разделения сигналов нейтронного и гамма излучения в условиях измерений в смешанных n/γ полях позволяет более чем на порядок увеличить скорость счета импульсов разработанных спектрометров.

**Апробация работы.**

Материалы, вошедшие в диссертацию, докладывались и обсуждались на научных семинарах в ГНЦ РФ ТРИНИТИ, РИЦ «Курчатовский Институт» и Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе РАН, а также на научных семинарах зарубежных лабораторий - СЕА (Франция, Кадараш), ENEA (Италия, Фраскати), JAERI (Япония, Нака и Токай-мура), JET-EFDA (Англия, Кэлхэм), VTT (Финляндия, Хельсинки) и Institute Nuclear Research (Чехия, Ржеж).

Полученные результаты неоднократно представлялись и обсуждались на международных совещаниях по диагностике ИТЭР и в рамках работы экспертной группы по нейтронной диагностике ИТЭР, в которой автор является представителем РФ.

Результаты и материалы, изложенные в диссертации, опубликованы в ведущих журналах по экспериментальной ядерной физике и физике плазмы «**Nuclear Instruments and Methods**», «**Review of Scientific Instruments**», «**Приборы и техника эксперимента**», «**Fusion Science and Technology**», «**Fusion Engineering and Design**», «**Nuclear Fusion**» и других. Часть результатов представлена на международных и всероссийских конференциях по ядерной физике и физике плазмы:

- 12<sup>th</sup> HTPD High Temperature Plasma Diagnostic, Princeton, USA, 1998
- XXVI Звенигородская конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу, Звенигород, 1999
- 27<sup>th</sup> EPS Conference on Contr. Fusion and Plasma Phys. Budapest, Hungary, 2000
- «Frontier Detectors for Frontier Physics», La biodola, Isola d'Elba, Italy, May 2003
- 10-я Всероссийская конференция по диагностике высокотемпературной плазмы, Красная Пахра, июнь 2003
- 31<sup>th</sup> EPS Conference on Contr. Fusion and Plasma Phys. London, UK, 2004
- 15<sup>th</sup> HTPD High Temperature Plasma Diagnostic, San Diego, USA, 2004
- 11-я Всероссийская конференция по диагностике высокотемпературной плазмы, Троицк - Звенигород, июнь 2005

Основные материалы, вошедшие в диссертацию, опубликованы в 14 печатных работах, список которых приведен в конце автореферата.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения и списка литературы из 95 наименований. Принята сквозная нумерация литературных ссылок. Параграфы и рисунки нумеруются по главам. Диссертация содержит 177 страниц текста, включающего 10 таблиц, 74 рисунков и приложение на 15 страницах.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Во **введении** обоснована актуальность темы исследований. Сформулированы цели и задачи, решаемые в диссертации. Отмечены научная и практическая ценность результатов работы, а также приведены основные положения, выносимые на защиту. Приведен список конференций и публикаций, в которых докладывались материалы диссертации.

В **главе 1** рассматривается высокотемпературная термоядерная плазма токамака как источник ионизирующего излучения. Представлены основные механизмы образования нейтронного и жесткого рентгеновского излучения в современных экспериментах с высокотемпературной d-d и d-t плазмой на больших токамаках. Выполнен обзор и представлены результаты анализа ядерно-физических данных о сечении и скорости термоядерных реакций с образованием нейтронов. Обсуждены процессы, влияющие на формирование энергетических спектров нейтронов в экспериментах на токамаках. Показано, что на больших токамаках ионизирующее излучение является смешанным нейтронно-фотонным полем,

вследствие, чего для достоверной интерпретации данных радиационных измерений необходимо проведение спектрометрических измерений.

Важнейшим параметром состояния плазмы, контролируемым при помощи нейтронной диагностики, является ионная температура плазмы. Определение ионной температуры  $T_i$  в центре шнура термоядерной плазмы с реакторными параметрами другими диагностическими методами затруднено. Информацию о величине  $T_i$  получают из анализа энергетического спектра термоядерных нейтронов. Ширина спектра на полувысоте  $\Delta E_n$  связана с ионной температурой  $T_i$  известными соотношениями:

$$\Delta E_n^{d-d} (\text{кэВ}) = 82.5 \sqrt{T_i (\text{кэВ})}, \quad \Delta E_n^{d-t} (\text{кэВ}) = 177 \sqrt{T_i (\text{кэВ})}.$$

Такой метод измерений является весьма привлекательным, поскольку производится анализ относительной величины – ширины энергетического спектра нейтронов на полувысоте  $\Delta E_n$ . При этом не требуется знаний абсолютных величин нейтронных потоков и плотности ионов плазмы. Результаты таких измерений  $T_i$  менее подвержены погрешностям, возникающим при высоких нагрузках, так как мертвое время измерительной системы (т.е. просчеты импульсов) более сильно искажает результаты абсолютных измерений плотности потока нейтронов, чем уширение энергетического спектра нейтронов.

Нейтронные спектрометры, применяемые для данных измерений можно разделить на два класса: классические и неклассические. К первым относятся спектрометры нейтронов, у которых функция отклика на моноэнергетическую линию нейтронов описывается распределением Гаусса. В нейтронных спектрометрах неклассического типа аппаратурный спектр при регистрации моноэнергетического нейтронного излучения (функция отклика) отличается от Гауссовского распределения. В частности, таким детектором является спектрометр нейтронов на основе органического сцинтиллятора (стильбен, BC501A, NE-213 и т.п.). Так как в органическом сцинтилляторе регистрируются протоны отдачи в результате упругого рассеяния нейтронов на ядрах водорода, функция отклика имеет вид «столика» с резким спадом в области максимальных энергий протонов. Для получения гауссовского распределения прибегают к операции дифференцирования аппаратурного спектра импульсов.

Ранее анализ погрешности определения  $T_i$  по результатам измерения уширения энергетического спектра нейтронов был выполнен для спектрометров классического типа. Было показано, что относительная погрешность определения ионной температуры  $\delta T_i$  связана с собственным разрешением нейтронного спектрометра  $R$  и статистической погрешностью измерений, обусловленной количеством зарегистрированных импульсов  $N$ , следующим соотношением:

$$\frac{\Delta T_i}{T_i} = \sqrt{\frac{2}{N}} \left( 1 + \frac{R^2}{\Delta E_n^2} \right) = \sqrt{\frac{2}{N}} \alpha \quad (1)$$

В материалах диссертации впервые представлен результат анализа погрешности определения  $T_i$  для измерений спектрометром нейтронов с органическим сцинтиллятором, с функцией отклика неклассического типа. Используя дифференцирование функции отклика с применением метода переноса погрешностей, получена формула для определения относительной статистической

погрешности ионной температуры  $\delta T_i^{cman}$  при измерениях спектрометром с органическим сцинтиллятором:

$$\delta T_i^{cman} = \left\{ \frac{a^2}{\sigma^2 \cdot \sqrt{N}} \right\} \cdot \left\{ \frac{1}{3} + m \left[ 1 - \left( \frac{\sigma}{a} \right)^2 \right]^2 / 8 \right\} \quad (2)$$

здесь  $a = m \cdot \Delta$  - шаг дифференцирования,  $\Delta$  - энергетическая ширина канала спектрометра,  $\sigma^2$  - дисперсия энергетического спектра нейтронов. При  $a \geq 2 \cdot \sigma$  формулу (2) можно записать в более простом виде  $\delta T_i^{cman} \leq \left\{ \frac{a^2}{\sigma^2 \cdot \sqrt{2N}} \right\}$ . Проведен

анализ систематической погрешности определения  $T_i$ , возникающей за счет «обрезания краев» распределения при дифференцировании аппаратурного спектра протонов отдачи. Показано, что оценка относительной систематической погрешности за счет «обрезания краев» распределения может быть выражена формулой:

$$\delta T_i^{cuc} \leq \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{a}{\sigma} \right) \cdot \exp \left[ - \frac{a^2}{2 \cdot \sigma^2} \right] \quad (3)$$

Численное моделирование аппаратурного спектра протонов отдачи и расчет по формулам (2) и (3) показали, что для обеспечения 10% погрешности измерения ионной температуры  $T_i$  требуемая статистика в анализируемом энергетическом интервале должна составлять не менее  $2,5 \times 10^3$  импульсов, что при требуемом временном разрешении 100 мсек соответствует «полезной» скорости счета 25 кГц или полной скорости счета нейтронного спектрометра на уровне 350 кГц. Как показывают экспериментальные данные, приведенные далее (главы 4 и 5), такое быстрое действие нейтронного спектрометра с аналоговым разделением сигналов по форме импульса принципиально не достижимо и может быть обеспечено только цифровыми методами обработки сигналов.

Разработан метод определения  $T_i$  и погрешности  $\Delta T_i / T_i$  из энергетического спектра термоядерных нейтронов, измеренного спектрометром с органическим сцинтиллятором. На основании полученных данных впервые сформулированы и обоснованы технические требования к спектрометру нейтронов на основе органического сцинтиллятора, необходимые для решения задачи измерения ионной температуры плазмы с погрешностью и временным разрешением, соответствующим требованиям ИТЭР.

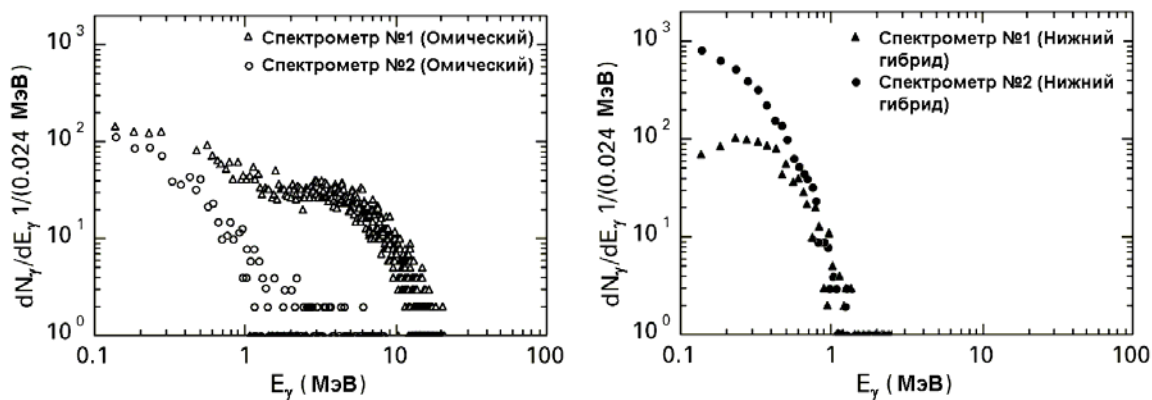
**Глава 2** посвящена исследованию природы ионизирующего излучения термоядерной плазмы токамака FTU и, в частности, изучению динамики «убегающих электронов» системой спектрометров гамма-излучения.

С участием автора для токамака FTU была разработана и внедрена многоканальная система измерений жесткого рентгеновского излучения на базе спектрометрических сцинтилляционных кристаллов NaI(Tl) с размерами  $\varnothing 63 \times 63$  мм. Система сбора данных, реализованная на базе стандартных спектрометрических модулей САМАС, под управлением программного комплекса *LabView* обеспечила удаленный контроль и передачу полученных данных в базу данных FTU в режиме «on-line». Созданная система обеспечивает измерение 16 амплитудных спектров за один импульс токамака во временных окнах 100 мс. Это позволило проследить динамику поведения жесткого рентгеновского излучения в различных энергетических диапазонах в течение всего импульса токамака FTU. Ранее, до



внедрения многоканальной спектрометрической системы пучок «убегающих электронов» характеризовался исключительно величиной максимальной (граничной) энергией жесткого рентгеновского излучения. Разработанный программный комплекс восстановления энергетических спектров фотонного излучения позволил не только определять граничную энергию жесткого рентгеновского излучения, но также, используя матричный метод обработки аппаратурных спектров, получать достоверные количественные характеристики поля жесткого рентгеновского излучения (плотность потока гамма квантов в месте расположения спектрометров). Созданная система применялась для анализа спектров гамма-излучения во время дейтериевых разрядов с омическим нагревом и в экспериментах с различными видами дополнительного нагрева плазмы.

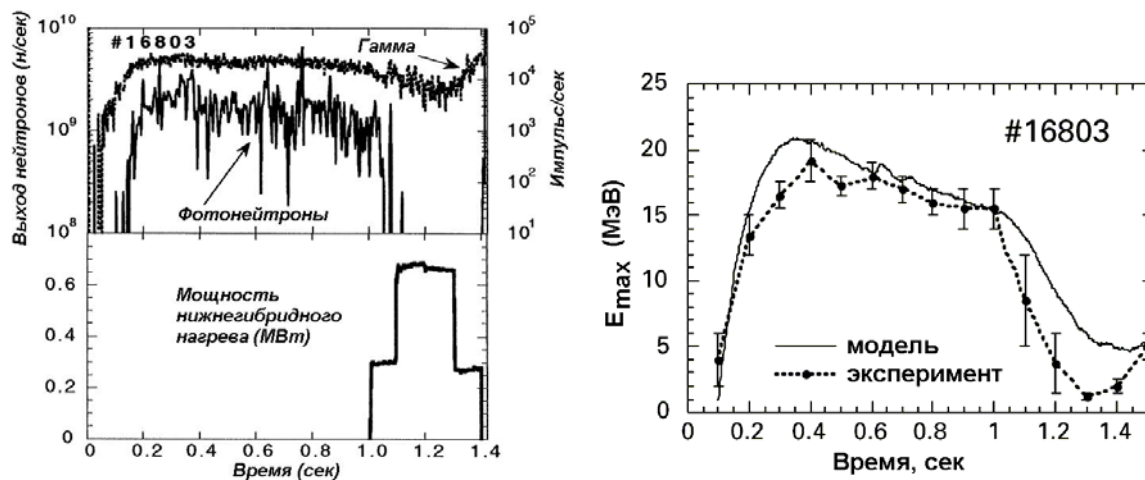
В качестве иллюстрации эффективного применения этой многоканальной спектрометрической системы в диссертации приведен анализ импульса токамака FTU #16803 – разряд с водородной плазмой с дополнительным нагревом на нижне-гибридной частоте.



**Рис.1** Энергетические спектры жесткого рентгеновского излучения, измеренные спектрометрами NaI-1 и NaI-2 в различных фазах разряда FTU #16803 – справа во время фазы омического разряда и формирования пучка «убегающих электронов», слева во время нижне-гибридного ВЧ нагрева.

На **Рис.1** показаны энергетические спектры гамма излучения, измеренные двумя спектрометрами NaI-1 и NaI-2 в различных фазах разряда токамака. Во время фазы омического нагрева плазмы  $t = 0-1$  сек различается не только форма энергетических спектров, но максимальная энергия фотонов (соответствующая граница энергетического спектра фотонов, измеренная спектрометром NaI-2 составляет  $\sim 20$  МэВ). Во время дополнительного нагрева на нижне-гибридной частоте  $t = 1-1,4$  сек измеренная максимальная энергия гамма-квантов значительно ниже ( $\sim 1-2$  МэВ) и оба энергетические спектра характеризуются одинаковым наклоном. На **Рис.2 а)** видно, что нейтроны, которые присутствуют во время омической фазы разряда FTU #16803, исчезают при включении нижне-гибридного ВЧ нагрева, когда энергия гамма-квантов и, следовательно, граничная энергия ускоренных электронов, становится ниже порога фотоядерных реакций. Поэтому, нейтроны, наблюдаемые во время омического нагрева ( $Y_n \sim 2 \times 10^9$  нейтр/сек), можно достоверно интерпретировать как фотонейтроны, которые возникают при попадании пучка убегающих электронов в лимитер и/или стенку вакуумной камеры. Образование фотонейтронов происходит главным образом в области полоидального лимитера. Этим объясняется зарегистрированная анизотропия нейтронного потока,

проявляющаяся в том, что наибольшая скорость счета нейтронов наблюдается у BF<sub>3</sub> счетчиков, расположенных ближе к лимитеру.



**Рис.2** Слева - эволюция нейтронного выхода и скорости счета гамма-спектрометра NaI-1 во время разряда FTU #16803 (водородная плазма) с нижнегибридным дополнительным нагревом (нижний график); справа - динамика изменения максимальной энергии убегающих электронов  $E_{\max}$  во время импульса FTU #16803: сравнение модели с экспериментальными результатами.

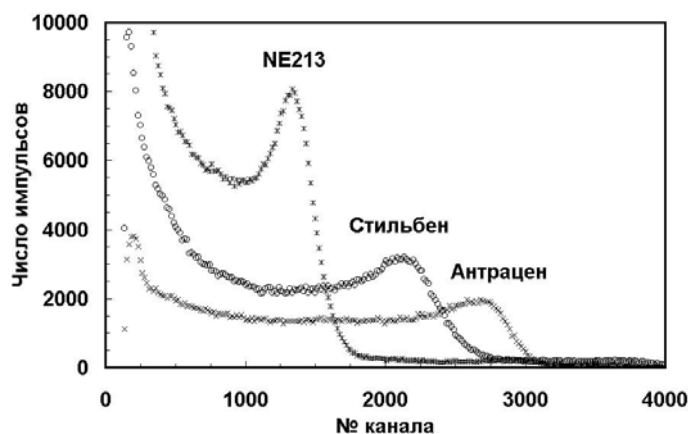
Для того, чтобы выделить часть спектра жесткого рентгеновского излучения, обусловленную «убегающими электронами», была разработана процедура вычитания спектра захватного гамма излучения из полного энергетического спектра гамма излучения. Захватная часть в каждом временном окне нормировалась на нейтронный поток, который определялся по показаниям BF<sub>3</sub> счетчиков. Измеренная максимальная энергия электронов сравнивалась с разработанной моделью, которая учитывает ускорение электронов в электрическом поле и синхротронные радиационные потери. Результаты сравнения для разряда FTU #16803 показаны на **Рис.2 б**). Сплошной линией показаны результаты моделирования для начальных условий, когда энергия электронов  $E = 1$  МэВ в момент  $t = 0,1$  сек.

Обобщая опыт разработки и применения новых диагностических средств на токамаке FTU, следует отметить, что определение характеристик термоядерной плазмы по данным измерений ионизирующего излучения в современных экспериментах на токамаках является сложной научно-технической задачей, связанной с регистрацией в смешанных полях нейтронного и гамма излучения в широком энергетическом интервале и с большим динамическим диапазоном интенсивности излучения. Рутинные измерения характеристик ионизирующего излучения на токамаке FTU наглядно продемонстрировали, что для получения достоверных данных и корректной интерпретации результатов необходимо применение спектрометрических методов регистрации как нейтронного, так и гамма излучения.

В **главе 3** представлено развитие методов регистрации нейтронов с использованием органических сцинтилляторов. При проведении экспериментов на токамаках требуется обеспечить измерение параметров нейтронных полей с высоким временным и энергетическим разрешением на фоне интенсивного сопутствующего гамма излучения. Наиболее подходящими детекторами для решения этих задач являются органические сцинтилляторы, обладающие высокими временным

разрешением и эффективностью регистрации, а так же возможностью разделения нейтронного и гамма излучения по форме импульса. Для уточнения существующего расхождения в опубликованных данных о величинах относительных световых выходов органических сцинтилляторов были выполнены сравнения их характеристик в идентичных условиях. На **Рис. 3** показаны аппаратурные спектры  $^{137}\text{Cs}$ , измеренные спектрометрами на основе кристаллов антрацена и стильбена, а также жидкого сцинтиллятора NE213. Измерения проводились с ФЭУ RCA-8575. Как видно из приведенных результатов, стильбен обладает большим световыходом и лучшим энергетическим разрешением по сравнению с традиционно используемым NE213. В сравнении с антраценом, кристалл стильбена имеет более быстрое время высвечивания сцинтилляций, что обеспечивает лучшее временное разрешение и в конечном итоге более высокую скорость счета. Таким образом, кристалл стильбена является оптимальным сцинтилляционным детектором для изучения эволюции характеристик нейтронных полей нестационарных источников ионизирующего излучения, какими являются термоядерные установки токамак.

Проведен анализ особенностей спектрометрии термоядерных нейтронов с органическим сцинтиллятором кристаллом стильбена. Детально рассмотрены эффекты, влияющие на формирование функции отклика спектрометра нейтронов с органическим сцинтиллятором и на эффективность регистрации. Проведены численные расчеты максимальных пробегов заряженных частиц (протонов и электронов) в кристалле стильбена и показано, что для кристаллов используемых в практических измерениях спектров d-d нейтронов учет краевых эффектов не требуется. При регистрации спектров d-t нейтронов кристаллами с толщиной  $h$  менее 1 – 2 см краевые эффекты будут существенно влиять на форму функции отклика и эти эффекты необходимо учитывать при выполнении процедуры восстановления энергетического спектра нейтронного излучения.



**Рис. 3** Аппаратурные спектры гамма источника  $^{137}\text{Cs}$  полученные в измерениях с различными органическими сцинтилляторами в идентичных условиях с ФЭУ RCA-8575.

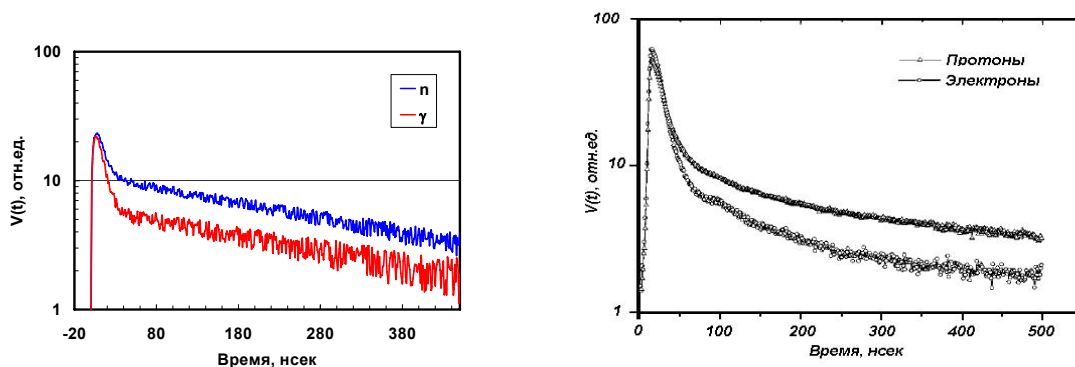
Рассмотрены физические основы разделения сигналов нейтронного и гамма излучения по форме импульса. Часто процесс сцинтилляции при регистрации ионизирующего излучения описывают простым экспоненциальным распадом. Детальные исследования времени высвечивания органических сцинтилляторов показали наличие быстрых и медленных компонентов сцинтилляций, т.е. эволюция

интенсивности сцинтилляционного свечения достаточно точно может быть описана двумя экспонентами:

$$I(t) = A \exp\left(-\frac{t}{\tau_a}\right) + B \exp\left(-\frac{t}{\tau_i}\right). \quad (4)$$

Для органических сцинтилляторов, и в частности для кристалла стибьбена, было обнаружено, что относительная амплитуда медленного компонента высвечивания  $B$  сильно зависит от величины удельной ионизации, производимой регистрируемой частицей, которая зависит от массы частицы. На этом эффекте основано разделение сигналов от различных типов ионизирующего излучения ( $n/\gamma$ ) по форме импульса. Форма анодного импульса ФЭУ определяется токовым импульсом  $I(t)$  и постоянной  $RC$  анодной цепи. На **Рис. 4** показаны рассчитанные для токового импульса (3) и измеренные быстрым АЦП (200 МГц, 12 бит) сигналы спектрометра с кристаллом стибьбена при регистрации нейтронов и фотонов.

Впервые выполнен анализ предельного быстродействия спектрометра с разделением сигналов по форме импульса. Предельное время, необходимое для анализа формы сигнала можно оценить, используя формулу (4). Подставляя численные значения можно показать, что при  $\tau$  порядка 5 нсек отношение сигналов равной амплитуды от нейтрона и гамма кванта достигнет уровня 90% от максимально возможного через время 30 нсек. Анализ формы импульса работает только в том случае, когда нет искажений формы сигнала за счет наложений импульсов.



**Рис. 4** Форма импульса спектрометра с кристаллом стибьбена от нейтронного и гамма излучения: слева – рассчитанная по формуле (3), справа – измеренная быстрым АЦП (200 МГц, 12 бит).

Для Пуассоновского распределения событий вероятность, того, что ни одно событие не произойдет в течение интервала времени  $t$  при среднем числе  $\lambda t$ , определяется формулой  $P(0) = \exp(-\lambda t)$ . Т.е. для того, чтобы вероятность наложения импульсов не превышала 1%, необходимо чтобы средняя частота следования импульсов не превышала значения  $\sim 330$  КГц. Эта величина может рассматривать в качестве теоретического предела быстродействия схемы разделения при обработке сигналов режиме реального времени, который реализуют традиционные аналоговые схемы. На практике, поскольку в аналоговых схемах применяют интегрирование сигналов, а также используют различные дополнительные условия отбора событий с целью улучшенного разделения нейтронов и гамма квантов, для анализа сигналов и формирования управляющих импульсов требуется несколько микросекунд. Это приводит к тому, что реальное быстродействие таких схем не превышает 150 -

200 кГц. Максимальная скорость счета нейтронного детектора зависит от суммарного потока ионизирующего излучения - нейтронов и гамма квантов, а также от соотношения их количеств. Таким образом, реальное быстродействие детектора с аналоговой схемой разделения сигналов по форме импульса на порядок ниже скорости счета, которую могут обеспечить органические сцинтилляторы с учетом их быстрого времени высвечивания.

В главе 1 были сформулированы требования, предъявляемые к спектрометру термоядерных нейтронов для определения  $T_i$ . На основании имеющихся данных об энергетической зависимости световыхода сцинтилляторов  $L(E)$  была выполнена оценка предельного энергетического разрешения для спектрометра нейтронов с жидким органическим сцинтиллятором NE213 (аналог BC501A производства компании «BICRON») и с кристаллом стильбена. Для BC501 было показано, что предельное энергетическое разрешение составляет  $dE_n/E_n = 0,64 \pm 0,7 dL/L$ . Это соответствует величинам  $\sim 7\%$  для d-d нейтронов и  $\sim 3\%$  для d-t нейтронов. Полученные данные очень хорошо согласуются с результатами измерений световыхода сцинтиллятора NE213 и его энергетического разрешения. Для кристалла стильбена анализ энергетической зависимости световыхода проводился по результатам прямых измерений энергетических спектров d-d и d-t нейтронов, выполненных на нейтронных генераторах. В сравнении с BC501 (NE213), спектрометр с кристаллом стильбена показал лучшие результаты. Энергетическое разрешение спектрометра с кристаллом стильбена для d-d нейтронов не более 150 кэВ ( $\sim 6\%$ ) и для d-t нейтронов – менее 300 кэВ ( $\sim 2\%$ ).

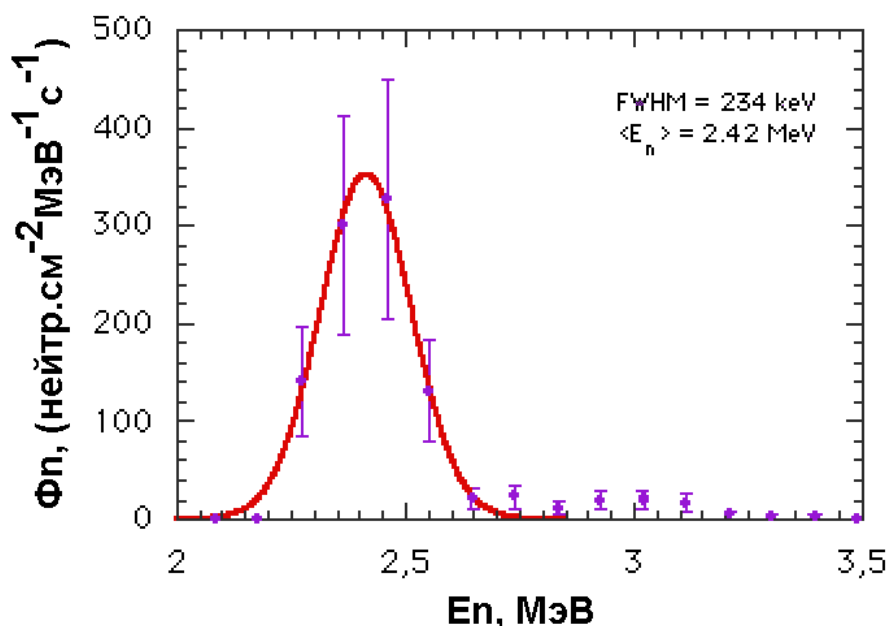
Приведены результаты, полученные автором при измерении энергетических спектров d-d и d-t нейтронов на нейтронных генераторах НГМ-17 и ИНГ-07 (ГНЦ РФ ТРИНИТИ), FNG (ENEA, Фраскати, Италия), FNS (JAERI, Япония), а также энергетические спектры калибровочных радионуклидных источников нейтронов  $^{241}\text{Am-B}$  и  $^{252}\text{Cf}$ .

Таким образом, в ходе выполнения исследований был разработан сцинтилляционный спектрометр с кристаллом стильбена, который обеспечивает энергетическое разрешение, предъявляемое к спектрометрам термоядерных нейтронов ИТЭР, и позволяет проводить измерения ионной температуры плазмы в диапазоне выше 4 кэВ.

В **главе 4** представлены результаты исследований характеристик нейтронного излучения термоядерной d-d плазмы детекторами с органическими сцинтилляторами в экспериментах на токамаках FTU, TORE-SUPRA и JT-60U.

Измерение спектра нейтронного излучения d-d плазмы токамака FTU проводилось с помощью сцинтилляционного детектора NE213, установленного в шестиканальном нейтронном коллиматоре. Эта диагностическая система предназначена для измерения профиля эмиссии d-d нейтронов из плазмы токамака. Для разделения сигналов нейтронного и гамма излучения использовался коммерческий аналоговый модуль Link Analytic 5020 PSD. Количество просчетов гамма-квантов в нейтронный канал не превышает  $1/10^3$ . Фоновый нейтронный сигнал, который может быть приписан нейтронам, рассеянным в конструкционных материалах, наблюдался во всех каналах многоканального нейтронного коллиматора. Несмотря на то, что в измерениях был установлен достаточно высокий энергетический порог 1,8 МэВ, вопрос о природе регистрируемого нейтронного излучения (термоядерные нейтроны или рассеянные, и их соотношение) оставался

открытым до тех пор, пока не был измерен энергетический спектр нейтронов. Поскольку скорость счета нейтронов не превышала 200-300 имп/сек, для получения удовлетворительной статистики приходилось суммировать аппаратные спектры, измеренные за время нескольких импульсов токамака с одинаковыми плазменными параметрами. Для этого было выбрано 10 разрядов с омическим нагревом дейтериевой плазмы. Энергетический спектр d-d нейтронов токамака FTU, измеренный в центральном канале нейтронного коллиматора с помощью жидкого сцинтиллятора NE213 показан на **Рис. 5**.

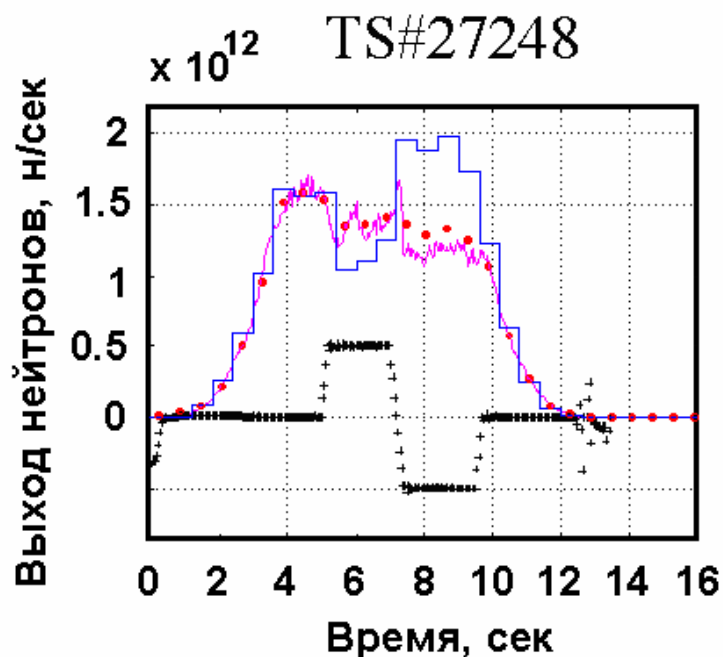


**Рис. 5** Энергетический спектр нейтронов токамака FTU, измеренный в омических режимах дейтериевой плазмы.

Средняя энергия в пике нейтронного спектра составляет 2,42 МэВ, что указывает на достаточно высокую точность калибровки энергетической шкалы, а так же на тот факт, что процедура восстановления спектра не искажает энергетическую шкалу спектрометра. Ширина на полувысоте энергетического спектра нейтронов токамака FTU равняется 234 кэВ и в значительной степени определяется энергетическим разрешением спектрометра, поскольку при температуре плазмы 1,3-1,5 кэВ ширина спектра нейтронов на полувысоте не превышает 100 кэВ. Таким образом собственное разрешение спектрометра NE213 составляет  $\sim 200$  кэВ или 8,7%.

Измерение нейтронной эмиссии плазмы токамака TORE-SUPRA спектрометром нейтронов с кристаллом стибьена проводилось с целью демонстрация возможности использования таких детекторов в качестве мониторов нейтронного потока при создании многоканальной системы контроля профиля нейтронного выхода плазмы токамака. Источником нейтронов являлась высокотемпературная d-d плазма с температурой ионов  $\sim 2$  кэВ. Детектор был расположен на расстоянии 7,34 м от оси плазменного шнура. Нейтронный спектрометр был помещен внутри защиты из полиэтилена толщиной 30 см. Перед защитой был установлен коллиматор из полиэтилена длиной 60 см с диаметром канала  $\varnothing 4$  см. Коллиматор был ориентирован таким образом, что линия наблюдения

находилась на 23 см ниже экваториальной плоскости токамака TORE-SUPRA. Специальные тестовые испытания для системы «детектор + коллиматор», как элемента многоканального монитора профиля нейтронного выхода из плазмы токамака, были выполнены во время омического разряда токамака TORE-SUPRA #27248. В течение этого разряда плазменный шнур перемещался следующим образом: на 5-й секунде шнур смещался на 10 см вверх, через 2 секунды перемещался на 20 см вниз и на 10-й секунде возвращался в исходное положение.



**Рис. 6** Временные диаграммы сигналов во время омического разряда токамака TORE-SUPRA #27248: гистограмма – нейтронный выход, измеренный детектором с кристаллом стильбена за время 600 мс, непрерывная линия – сигнал монитора нейтронного выхода - камера деления  $^{235}\text{U}$  в замедлителе, “+” – вертикальные перемещения плазменного шнура, “•” – интенсивность гамма излучения, измеренная детектором с кристаллом стильбена в тех же временных окнах.

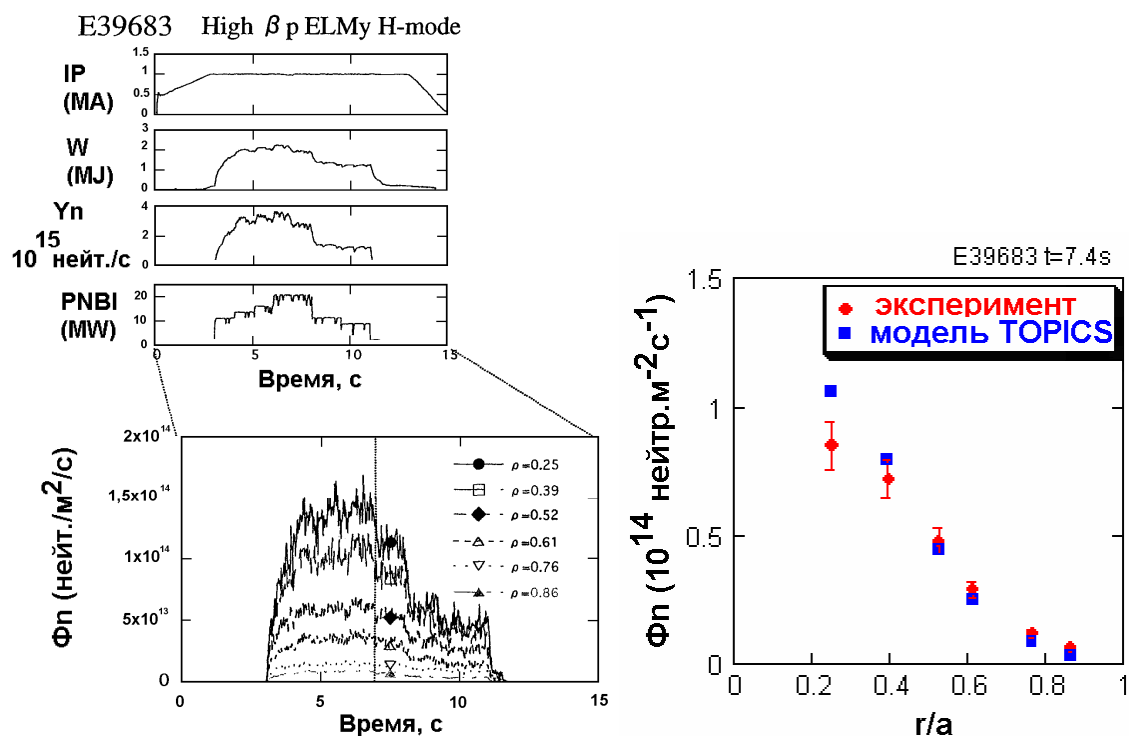
Временные диаграммы сигналов детектора с кристаллом стильбена, монитора нейтронного выхода с камерами деления и датчика положения плазменного шнура показаны на **Рис. 6**. При движении плазмы вверх центр плазменного шнура удаляется от линии наблюдения коллиматора и скорость счета стильбенового детектора уменьшается. При движении в обратном направлении центр плазменного шнура приближается к оси коллиматора и сигнал детектора возрастает, в то время как сигнал монитора нейтронного выхода на базе камеры деления практически не изменяется. Точками на **Рис. 6** показана эволюция интенсивности гамма излучения, измеренная детектором с кристаллом стильбена. Как видно на этих рисунках, сигнал гамма излучения хорошо совпадает с сигналом монитора нейтронного выхода установки.

Успешная демонстрация применения нейтронного спектрометра с кристаллом стильбена в измерениях с одноканальным коллиматором на токамаке TORE-SUPRA способствовала развитию методики многоканальных измерений профиля нейтронного источника. Разработка компактного детектора с улучшенными характеристиками позволили приступить к созданию проекта многоканального



нейтронного коллиматора на токамаке JT60U, который удалось разместить в достаточно тесных условиях действующего большого токамака. Габаритные размеры блока защиты коллиматоров в сборе составляют 2,6×1,3×1,6 метров. Все коллиматоры установлены в одной полоидальной плоскости на расстоянии 5 метров от центра плазменного шнура. Такое расположение линий наблюдения определяется единственно доступным пространством для размещения нейтронного коллиматора в экспериментальном зале токамака JT-60U [9]. Как показал анализ результатов измерений на токамаке TORE-SUPRA, наибольший вклад в фон гамма излучения вносит захват тепловых нейтронов на водороде с испусканием квантов с энергией 2,23 МэВ. Набор каналов с различными диаметрами позволяет уменьшать плотность потока нейтронов на порядок, обеспечивая при этом оптимальные условия работы детекторов и минимально возможную статистическую погрешность измерений.

В качестве примера применения данной методики, в диссертации приведены результаты измерения профиля нейтронной эмиссии плазмы токамака JT-60U в типичном разряде с переходом в ELM - H-моду. На **Рис.7 а)** показаны временные диаграммы основных плазменных параметров разряда № 39683: ток плазмы  $I_p=1,0$  МА, тороидальное магнитное поле  $B_T = 2,0$  Т. Динамика нейтронных сигналов во время инъекции нагревных пучков нейтралов всех детекторов системы мониторинга профиля нейтронной эмиссии показана на **Рис.7 а)**.



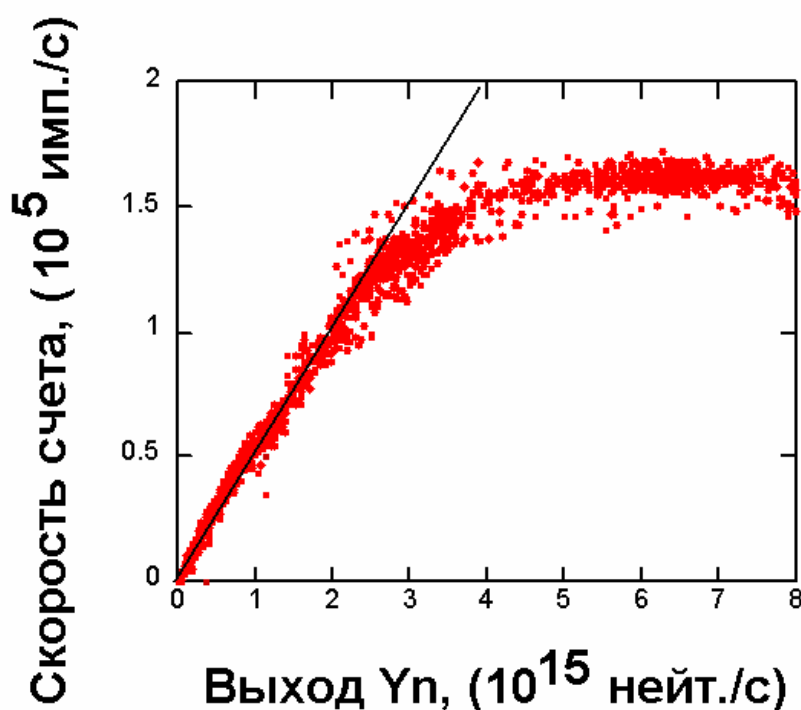
**Рис. 7** Временные диаграммы разряда № 39683 токамака JT60U с переходом в ELM - H моду: слева – основные плазменные параметры и сигналы детекторов монитора нейтронного профиля; справа – восстановленный профиль нейтронной эмиссии в момент времени  $t=7,4$  сек.

На **Рис.7 б)** показан профиль нейтронной эмиссии плазменного шнура в момент времени  $t = 7,4$  сек разряда № 39683 токамака JT-60U, восстановленный по результатам измерения многоканальной системы мониторов нейтронного профиля. Для сравнения здесь же показаны результаты, расчетов по программе TOPICS, в



которой вычисляются вклады в профиль d-d нейтронов, испускаемых в результате взаимодействия в термализованной плазме ( $th$ ), а также в результате взаимодействия пучок-плазма ( $b-th$ ) и пучок-пучок ( $b-b$ ). По данным этих расчетов доли нейтронов от взаимодействий  $th$ ,  $b-th$ ,  $b-b$  составляют 11%, 69%, 20%, соответственно. На **Рис. 7 б**) представлен нейтронный сигнал для детекторов с учетом всех типов взаимодействия ( $th$ )+( $b-th$ ) +( $b-b$ ). Наблюдаемое отклонение в 30% для центрального канала № 1 между результатами измерений и расчетными данными объясняются высокой загрузкой детектора и насыщением скорости счета при частоте свыше 150 кГц. Для всех остальных детекторов – каналы № 2 - 6 расхождение между расчетными и экспериментальными данными не превышает 10%.

Проверка линейности скорости счета детекторов в зависимости от нейтронного выхода была проведена посредством анализа более четырехсот разрядов токамака JT-60U, в которых нейтронный выход находился в диапазоне  $10^{14}$ - $10^{16}$  нейт/сек.. Зависимость скорости счета детектора в центральном канале № 1 от полного нейтронного выхода, измеренного абсолютно калиброванными камерами деления с  $^{235}\text{U}$  показана на **Рис.8**.



**Рис. 8** Соотношения между скоростью счета детектора с кристаллом стилибена в канале №1 системы определения профиля нейтронной эмиссии и полным нейтронным выходом  $Y_n$  в экспериментах на токамаке JT60U, измеренным абсолютно калиброванной камерой деления  $^{235}\text{U}$ .

Как видно из приведенных данных, в случае использования канала коллиматора  $\varnothing 30$  мм скорость счета детектора пропорциональна показаниям камер деления вплоть до нейтронного выхода  $3 \times 10^{15}$  нейт/с. Полученные экспериментальные результаты указывают, что максимальная скорость счета детектора с кристаллом стилибена составляет  $\sim 1,5 \times 10^5$  имп/с.

В **главе 5** представлены результаты исследования характеристик нейтронного излучения термоядерной d-t плазмы в экспериментах на токамаке JET.

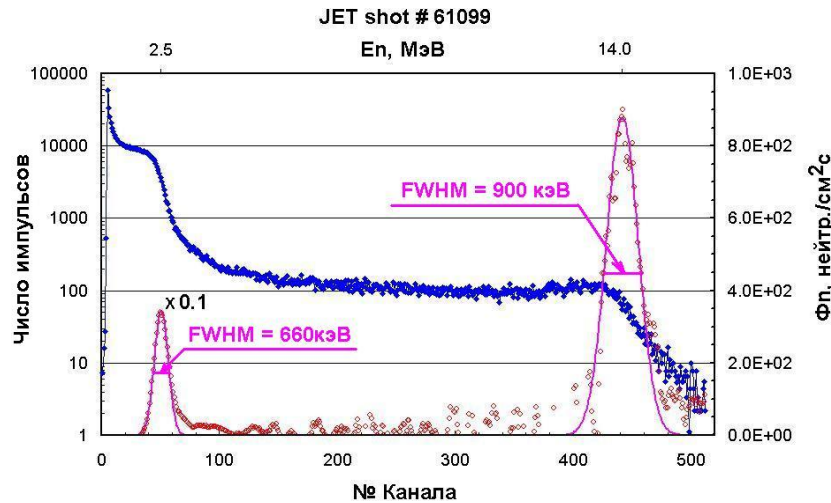
В отличие от других типов спектрометров термоядерных нейтронов, спектрометры с органическими сцинтилляторами позволяют проводить одновременные измерения спектров d-d и d-t нейтронов из термоядерной d-t плазмы. Одновременная спектрометрия d-d и d-t нейтронов позволит не только определить температуру ионов дейтерия и трития, но и в конечном итоге определить отношение концентраций различных видов термоядерного топлива (дейтерия и трития) в плазме. Принципиальная возможность одновременных измерений d-d и d-t нейтронов была экспериментально показана во время тритиевых экспериментов ТТЕ («trace tritium experiment») на токамаке JET детекторами с кристаллом стильбена (разработан в ГНЦ РФ ТРИНИТИ) и NE213 (РТВ, Germany).

Для проведения измерений во время ТТЕ кампании на токамаке JET был изготовлен спектрометр нейтронов с кристаллом стильбена с усовершенствованной схемой аналогового разделения сигналов по форме импульса. Эффективность регистрации нейтронов и энергетическое разрешение спектрометра предварительно были изучены на D-T нейтронном генераторе ИНГ-07. Исходя из условий проведения измерений на токамаке JET и выбранного места расположения спектрометра, для измерений был выбран кристалл с размерами  $\varnothing 30 \times 30$  мм. В целом во время предварительной калибровки спектрометр показал превосходные характеристики при спектрометрии нейтронов с энергией 14 МэВ: энергетическое разрешение составило  $> 300$  кэВ; эффективность регистрации соответствовала расчетной и равнялась -  $3 \times 10^{-2}$ .

Спектрометр с кристаллом стильбена был установлен в лаборатории, находящейся над крышей экспериментального зала токамака JET. В толще крыши над токамаком напротив вертикального порта установлен нейтронный коллиматор. Длина коллиматора составляет  $\sim 2$  м, диаметр 1,5 см.. На самом токамаке установлен предварительный коллиматор с регулируемой апертурой. Расстояние от спектрометра до оси плазменного шнура составляло  $\sim 20$  м. В этом случае регистрируются только нейтроны, испущенные перпендикулярно к току плазмы.

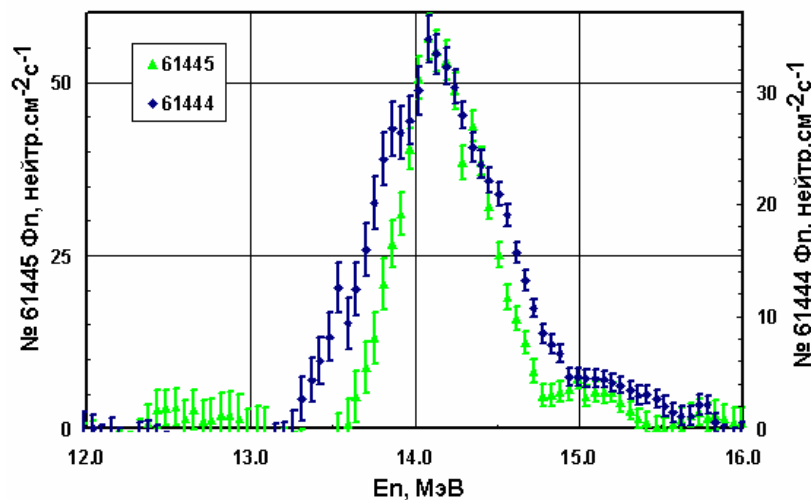
Примером одновременного измерения спектров d-d и d-t нейтронов во время DT разряда JET #61099 с напуском трития, могут служить результаты, показанные на **Рис.9**. На рисунке приведен измеренный амплитудный (аппаратурный) спектр (синий) и восстановленный энергетический спектр нейтронов (красный). Как видно из представленных данных, используя результаты только одной этой методики, может быть одновременно определена ионная температура  $T_i$  и выходы d-d и d-t нейтронов, что позволит в конечном итоге позволяет определить отношение плотностей различных видов топлива  $n_D/n_T$  в плазме, используя данные о реактивности термоядерной реакции.

Нейтронный спектрометр с кристаллом стильбена, установленный за перпендикулярным вертикальным коллиматором позволил проводить эффективные измерения во многих разрядах JET во время ТТЕ экспериментов, в частности при изучении режимов с ионным циклотронным нагревом на фундаментальной частоте малой добавки трития и с ионным циклотронным нагревом на второй гармонике трития. Энергетические спектры d-t нейтронов, вылетевших перпендикулярно к плазменному шнуру, измеренные спектрометром с кристаллом стильбена во время экспериментов JET с напуском трития и различными вариантами ионного циклотронного нагрева, показаны на **Рис.10** и **Рис. 11**.



**Рис. 9** Аппаратурный ( $\blacklozenge$ ) и энергетический ( $\bullet$ ) спектры нейтронов, измеренные спектрометром с кристаллом стильбена во время DT разряда JET #61099 с напуском трития.

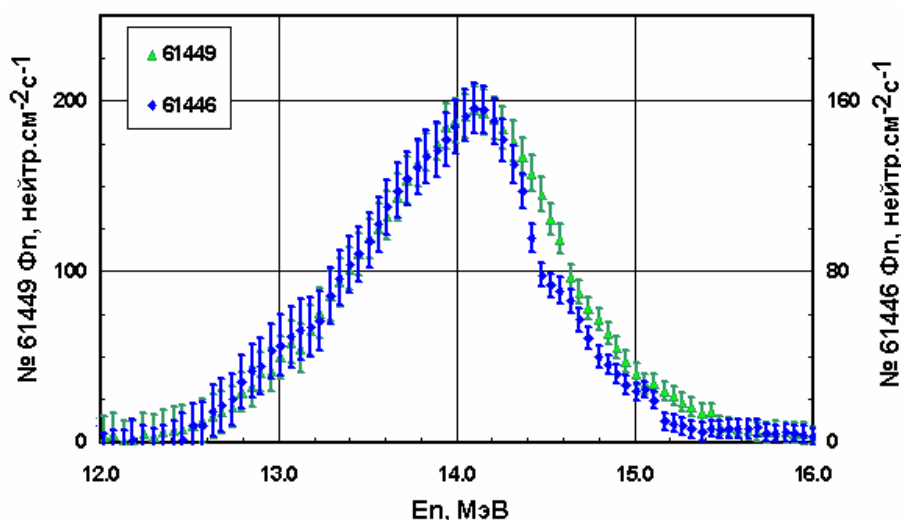
На **Рис.10** показаны энергетические спектры нейтронов, измеренные во время двух разрядов JET с ионным циклотронным нагревом (ICRH) на второй гармонике трития. Основные плазменные параметры, а также мощность нагрева  $P_{ICRH} = 4,5$  МВт в обоих случаях были одинаковы. Различие было только в фазировке волны: в разряде #61444 – дипольная, в разряде #61445  $+90^0$ .



**Рис. 10** Энергетические спектры DT нейтронов, измеренные в экспериментах JET с напуском трития и ионным циклотронным нагревом на второй гармонике. Мощность нагрева  $P_{ICRH} = 4,5$  МВт со следующими фазировками волны: дипольная (разряд JET #61444 ( $\blacklozenge$ )) и  $+90^0$  (разряд JET #61445 ( $\blacktriangle$ )).

Ширина на полувысоте энергетического спектра нейтронов в разряде с дипольной фазировкой составила  $870 \pm 50$  кэВ, в разряде с фазировкой  $+90^0$  ширина спектра равна  $630 \pm 50$  кэВ. Как видно, в случае дипольной фазировки волны нагрев осуществляется эффективнее, а различие в ионной температуре надежно регистрируется нейтронным спектрометром с кристаллом стильбена.

На **Рис. 11** показаны энергетические нейтронные спектры для двух разрядов JET с ионным циклотронным нагревом на резонансной частоте малой добавки трития. Ширина на полувысоте энергетического спектра нейтронов в разряде #61446 равнялась  $1270 \pm 60$  кэВ, в разряде #614496 -  $1140 \pm 60$  кэВ. В первом случае нагрев проводился на более высокой мощности  $P_{ICRH} = 1,4$  МВт (положении резонансного слоя на  $R=2,61$  м,  $B_t = 4,0$  Т). Во втором случае мощность нагрева  $P_{ICRH} = 1,2$  МВт (положение резонансного слоя на  $R=2,56$  м,  $B_t = 3,9$  Т). Как показали эти измерения, спектрометр нейтронов с кристаллом стильбена является достаточно чутким инструментом определения эффективности нагрева плазмы на ионно-циклотронной частоте – увеличение вводимой мощности на 200 кВт надежно регистрируются прибором.



**Рис. 11** Энергетические спектры d-t нейтронов, измеренные в экспериментах JET с напуском трития и ионным циклотронным нагревом на фундаментальной частоте малой тритиевой добавки. Условия экспериментов:  $P_{ICRH}=1,2$  МВт,  $B_t= 3,9$  Т (разряд #61446 (♦)) и  $P_{ICRH}=1,4$  МВт,  $B_t = 4,0$  Т (разряд #61449 (▲)).

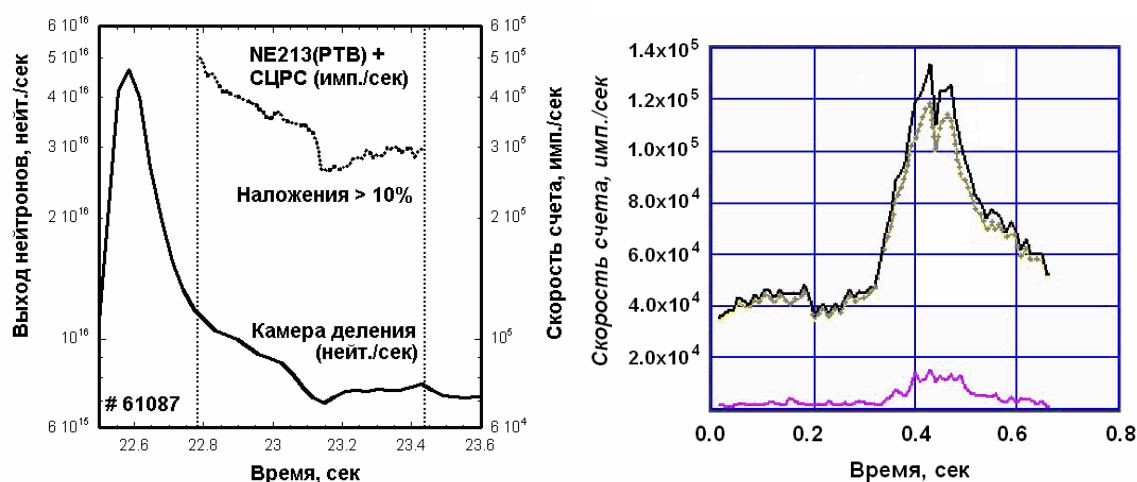
Во всех указанных экспериментах d-t нейтроны образовывались в реакциях синтеза между относительно «холодными» дейтронами и резонансными, быстрыми и сильно анизотропными тритонами. В этом случае ширина на полувысоте энергетического спектра нейтронов  $\Delta E_{n1/2}$  определяется так называемой «перпендикулярной эффективной температурой» резонансных тритонов  $T_T$ . Эта зависимость имеет вид:

$$\Delta E_{n1/2} = 178 \sqrt{\frac{(3T_T + 2T_D)}{5}} = 138 \sqrt{T_T}, \quad (5)$$

здесь  $T_D$  – температура дейтронов. Используя эту формулу, была определена «перпендикулярная эффективная температура» резонансных тритонов для всех рассмотренных экспериментов. Значения  $T_T$  были равны:  $85 \pm 8$  кэВ (разряд #61449),  $68 \pm 7$  кэВ (#61446),  $40 \pm 5$  кэВ (#61444) и  $21 \pm 3$  кэВ (#61445). Эксперименты с ионно-циклотронным нагревом d-t плазмы на токамаке JET показали, что сцинтилляционный спектрометр с кристаллом стильбена позволяет надежно измерять «эффективную ионную температуру» подтверждая эффективность некоторых сценариев высокочастотного нагрева плазмы при различных мощностях и фазировках ВЧ волн.

Для расширения динамического диапазона измерения плотности потока нейтронов в экспериментах на токамаке JET была применена система цифрового разделения сигналов нейтронного и гамма излучения с детектором NE213. Создан пакет программ для цифрового анализа непрерывного потока измеряемых данных сцинтилляционного детектора, состоящий из нескольких независимых частей, которые выполняют следующие операции:

- фильтрация сигналов для уменьшения влияния низкочастотного шума;
- поиск и идентификация максимума зарегистрированного сигнала;
- реорганизация входных данных во временные окна с фиксированной длительностью (обычно 96 точек на 1 импульс с 20 точками пре триггера);
- идентификация наложений сигналов;
- интегрирование сигналов;
- построение двумерной диаграммы интенсивности (**Рис. 13**) для графического отображения разделения сигналов от нейтронов и гамма-квантов и построения амплитудных спектров от нейтронного и гамма излучения.

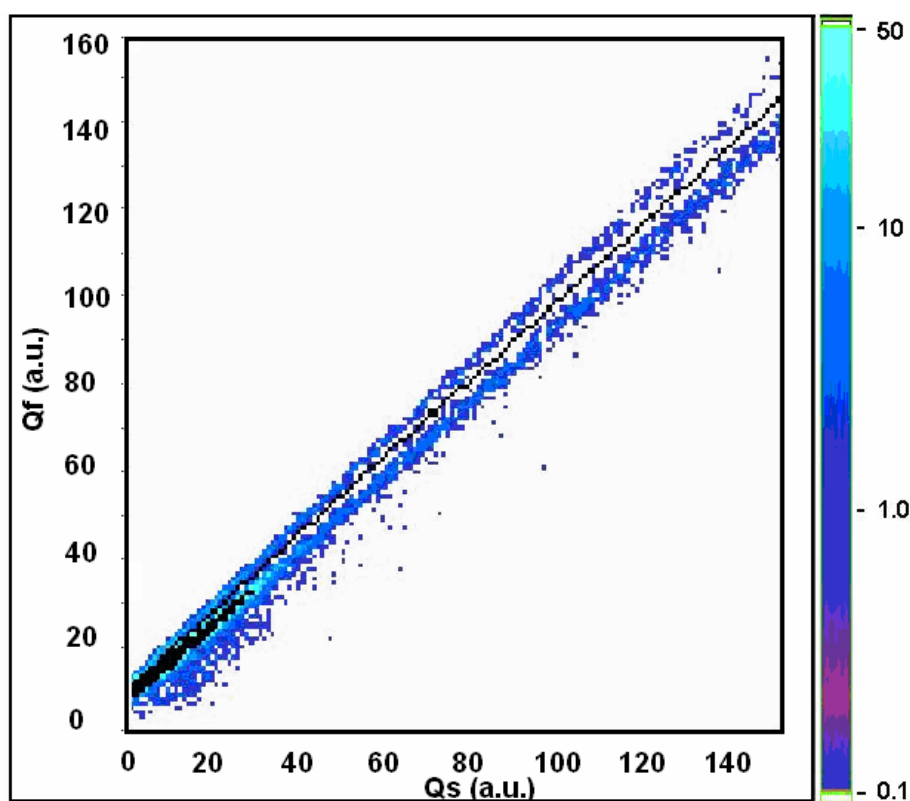


**Рис. 12** Слева - нейтронный выход из измерений абсолютно калиброванным монитором на основе камеры деления и интегральной скорости счета нейтронного сигнала детектора NE213 (РТВ), полученной системой цифрового разделения импульсов (96 точек на импульс) во время d-t разряда JET #61087; справа - динамика сигналов детектора NE213 (РТВ) во время разряда токамака JET #61074: интегральная скорость счета нейтронных импульсов, скорости счета одиночных и наложенных импульсов (нижняя линия).

Представлены результаты измерений детектором NE213 с системой цифрового разделения сигналов на токамаке JET. Детектор NE213 был установлен в той же лаборатории, что и спектрометр с кристаллом стильбена. Данные собирались в разрядах с различными условиями дополнительного нагрева плазмы – инъекцией нейтральных атомов и радиочастотным нагревом, а так же при различных топливных составах – d-d и d-t плазма. Максимальная скорость счета импульсов в этих экспериментах достигала  $\sim 2$  МГц. Временные диаграммы динамики потока нейтронов, зарегистрированные при помощи цифровой систем разделения сигналов находятся в хорошем согласии с данными монитора нейтронного выхода на основе камер деления. Данные на **Рис. 12 а)** показывают сигналы во время разряда токамака JET № 61087, в котором был впрыск тритиевого топлива в дейтериевую плазму в

течение 90 мсек и осуществлялся дополнительный нагрев инжектируемым пучком нейтралом мощностью 15 МВт.

Система цифрового разделения сигналов позволяет корректировать просчеты, неминуемо возникающие в аналоговых системах регистрации за счет мертвого времени. В качестве примера на **Рис. 12 б)** показаны интегральная скорость счета нейтронных импульсов, а так же скорости счета одиночных и наложенных импульсов. Из приведенных данных видно, что даже для таких достаточно быстрых детекторов, как органические сцинтилляторы, при интегральной скорости счета  $(3\div 5)\times 10^5$  имп/сек количество просчетов за счет наложений превышает 10% и требуется соответствующая корректировка результатов. Разделение нейтронного и гамма излучения показано на двумерной диаграмме интенсивности в пространстве  $Q_f$ - $Q_s$ . Цветная шкала используется для отображения количества событий: импульсы гамма квантов и нейтронов расположены соответственно выше и ниже белой линии разделения на **Рис. 13**.



**Рис. 13** Разделение нейтронного и гамма излучения детектора NE213 (РТВ), полученное при помощи системы цифрового разделения сигналов. Разряд токамака JET #61087, временной интервал  $\Delta t=23,1-23,3$  сек.

Для реализации высокого быстродействия органических сцинтилляторов была создана система цифрового разделения сигналов нейтронного и гамма излучения. Система расширила динамический диапазон измерений плотности потока нейтронов, при этом более чем на порядок увеличилась скорость счета сцинтилляционного детектора в сравнении с аналоговым детектором. Новая диагностическая система позволила повысить временное разрешение и снизить погрешность измерений нейтронного выхода термоядерной плазмы.

## Основные результаты работ

1. Разработаны, созданы и апробированы методы спектрометрии нейтронного и гамма излучения термоядерной плазмы токамаков с целью последующего использования новых диагностических средств для исследования характеристик реакторной термоядерной плазмы в экспериментах на ИТЭР. В том числе были:

- обоснованы и разработаны методологические основы спектрометрии термоядерных нейтронов при помощи детекторов с органическими сцинтилляторами, включая разработку алгоритмов восстановления энергетических спектров термоядерных нейтронов и создание соответствующего комплекса программного обеспечения;

- проанализированы особенности спектрометрии термоядерных нейтронов, что позволило определить необходимые требования к спектрометрам с органическими сцинтилляторами по быстродействию и энергетическому разрешению;

2. Разработана и внедрена многоканальная система измерений жесткого рентгеновского излучения на базе спектрометрических сцинтилляционных кристаллов *NaI(Tl)*. Созданный программный комплекс восстановления энергетических спектров фотонного излучения позволил не только определять максимальную энергию жесткого рентгеновского излучения, но также, используя матричный метод обработки аппаратурных спектров, получать достоверные количественные характеристики поля жесткого рентгеновского излучения (плотность потока фотонов).

3. Экспериментально определено и обосновано предельное быстродействие спектрометра с разделением сигналов по форме импульса и предельное энергетическое разрешение спектрометров нейтронов с жидким органическим сцинтиллятором и кристаллом стильбена. Для кристалла стильбена анализ энергетической зависимости световыхода и прямые измерения энергетического разрешения для d-d и d-t нейтронов показали лучшие результаты в сравнении с NE213.

4. Разработанные спектрометры нейтронного излучения применялись в экспериментах с термоядерной d-d плазмой на токамаках FTU, TORE-SUPRA, и JT-60U для определения ионной температуры в центре плазменного шнура и исследования пространственного распределения источника т/я нейтронов.

5. В экспериментах с ионно-циклотронным нагревом d-t плазмы на токамаке JET с помощью спектрометра нейтронов с кристаллом стильбена получены данные, подтверждающие эффективность некоторых сценариев ВЧ нагрева плазмы.

6. Впервые реализована и применена в измерениях на токамаках система цифрового нейтрон/гамма разделения сигналов органического сцинтиллятора по форме импульса. Разработанная цифровая система позволила существенно расширить динамический диапазон измерений плотности потока нейтронов и более чем на порядок увеличить скорость счета детектора с органическим сцинтиллятором в сравнении с системами аналоговой обработки сигналов. Это позволило повысить временное разрешение и снизить погрешность измерений нейтронного выхода термоядерной плазмы. Разработан пакет программ для цифрового анализа непрерывного потока данных детектора, включающий в себя все необходимые операции обработки данных и позволяющий проводить анализ динамики интенсивности ионизирующего излучения термоядерной плазмы токамака с одновременным разделением на спектральные составляющие нейтронного и гамма излучения.

## СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ

1. D.V. Portnov, Yu.A. Kaschuck, et al. «*A diagnostic system for neutron and gamma-ray spectrometry on FTU tokamak*». XXVI Звенигородская конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу. г. Звенигород, Московская обл., 5-9 апреля 1999
2. Yu.A. Kaschuck, D.V. Portnov, et al. «*Compact neutron generator for diagnostic applications*», 12<sup>th</sup> Topical Conference on High Temperature Plasma Diagnostics, Princeton (USA), 7-11 June, 1998. Published in Rev. Sci. Instrum., 70 (1999), 1104
3. J.R. Martin-Solis, B. Esposito, R. Sanchez, L. Bertalot, S. Rollet, Yu.A. Kaschuck, D.V. Portnov «*Runaway Electron Measurements in the FTU Tokamak*». 27th EPS Conference on Contr. Fusion and Plasma Phys. Budapest, 12-16 June 2000 ECA Vol. 24B (2000), 165
4. B. Esposito, L. Bertalot, Yu.A. Kaschuck et al. «*A gamma-ray spectrometer system for fusion applications*» Nucl. Instr. and Meth., A476 (2002), 522
5. Yu.A. Kaschuck, B. Esposito, et al. «*Fast neutron spectrometry with organic scintillators applied to magnetic fusion experiments*» Nucl. Instr. and Meth., A476 (2002), 511
6. M. Ishikawa, T. Nishitani, A. Morioka, M. Takechi, K. Shinohara, M. Shimada, Y. Miura, and M. Nagami, Yu. A. Kaschuck «*First measurement of neutron emission profile on JT-60U using Stilbene neutron detector with neutron-gamma discrimination*» Rev. Sci. Instrum., 73 (2002), 4237
7. Семенов В.П., Трыков Л.А., Кашук Ю.А. «*Оценка погрешности определения ионной температуры термоядерной плазмы с помощью сцинтилляционного спектрометра нейтронов*», 10-я Всероссийская конференция «*Диагностика высокотемпературной плазмы*», Пахра, Московская обл., 10-15 июня, 2003
8. А.В. Красильников, С. I. Walker, Ю.А. Кашук, Д.В. Просвирина, «*Многоканальный нейтронный коллиматор для токамака ИТЭР*», 10-я Всероссийская конференция «*Диагностика высокотемпературной плазмы*», Пахра, Московская обл., 10-15 июня 2003. Напечатано в ПТЭ № 2 (2004), 1
9. Yu.A.Kaschuck, et.al., «*Neutron Measurements during Trace Tritium Experiments at JET Using a Stilbene Detector*» at 31 EPS PPCF Conference, London, 2004
10. S. Popovichev, L. Bertalot, M. Adams, A. Alekseyev, M. Angelone, C.D. Challis, S. Conroy, N. Hawkes, V. Kiptily, Yu. Kaschuck, A.Krasilnikov, et. al., «*Performance of Neutron Measurements during Trace Tritium Experiments on JET*» presented at 31 EPS PPCF Conference, London, 2004
11. B. Esposito, Y. Kaschuck et al. «*Digital pulse shape discrimination in organic scintillators for fusion applications*» Conference «*Frontier Detectors for Frontier Physics*», La biodola, Isola d'Elba, Italy, 25-31 May 2003. Published in Nucl. Instr. and Meth., A 518 (2004), 626
12. B. Esposito, Yu.A. Kaschuck, et.al., «*Neutron measurements on JET using a NE213 scintillator with digital pulse shape discrimination*» 15<sup>th</sup> Topical Conference on High Temperature Plasma Diagnostics, San Diego (USA), 19-22 April, 2004. Published in Rev. Sci. Instrum., 75 (2004), 3550
13. L. Bertalot, J.M. Adams, M. Angelone, S. Conroy, B. Esposito, Y. Kaschuck et all. «*ITER relevant developments in neutron diagnostics during the JET Trace Tritium campaign*» presented at 23<sup>rd</sup> Symposium on Fusion Technology (SOFT 2004), Venice, Italy, 20-24 Sept. 2004. Published in Fusion Engineering and Design, 74 (2005), 835
14. A.V. Krasilnikov, M. Sasao, Yu.A. Kaschuck et all. «*Status of ITER Neutron Diagnostic Development*», 20<sup>th</sup> IAEA Fusion Energy Conference, Vilamoura, Portugal, 1-6 Nov. 2004. Published in Nuclear Fusion, 45 (2005), 1503



