

## РАЗРАБОТКА ДВУХКООРДИНАТНОГО ДЕТЕКТОРА ТЕПЛОВЫХ НЕЙТРОНОВ С ВХОДНЫМ ОКНОМ $600 \times 600$ мм

© 2020 г. В. А. Андреев<sup>а</sup>, Т. А. Гвелесиани<sup>а</sup>, Т. И. Глушкова<sup>а</sup>,  
М. Р. Колхидашвили<sup>а</sup>, А. Г. Крившич<sup>а,\*</sup>, Е. Н. Леонова<sup>а</sup>, Д. А. Майсузенко<sup>а</sup>,  
В. А. Соловей<sup>а</sup>, О. П. Федорова<sup>а</sup>, А. А. Фетисов<sup>а</sup>

<sup>а</sup> Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова  
Национального исследовательского центра “Курчатовский институт”  
Россия, 188300, Гатчина Ленинградской обл., мкр. Орлова роща, 1

\*e-mail: krivshich\_ag@pnpi.nrcki.ru

Поступила в редакцию 26.02.2020 г.

После доработки 10.03.2020 г.

Принята к публикации 11.03.2020 г.

Описан двухкоординатный детектор тепловых нейтронов, разработанный в НИЦ “Курчатовский институт”–ПИЯФ для малоуглового дифрактометра. Детектор с площадью регистрации  $600 \times 600$  мм<sup>2</sup> создан на основе многопроволочной пропорциональной камеры. В качестве конвертора нейтронов используется газовая смесь, содержащая <sup>3</sup>He. Для повышения чистоты газа и увеличения срока жизни детектора в экспериментальных условиях без перезаполнения рабочего объема разработана и применена новая технология изготовления электродов. Сбор данных осуществляется системой регистрации на основе катодного метода съема информации на LC-линии задержки, которая размещена внутри детектора. Конструкция детектора предусматривает возможность его использования в вакууме.

DOI: 10.31857/S0032816220040217

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Пространственные и энергетические характеристики пучка нейтронов в малоугловом дифрактометре (рис. 1) формируются нейтроноводной системой 2, монохроматором 3 и коллимационной системой 4. Прямой пучок приходит на исследуемый образец 7, рассеянные на образце нейтроны регистрируются детектором нейтронов 9. Регистрация нейтронов в различных диапазонах переданных импульсов, а также широкий диапазон по переданному импульсу обеспечиваются перемещением детектора вдоль оси пучка. Снизить вклад рассеянных на воздухе нейтронов по

пути от образца к детектору удается за счет использования вакуумируемой трубы 8, в которую помещен детектор 9.

Работа детектора 9 в вакууме предъявляет ряд требований к конструкции детектора, в частности необходимо изолировать от вакуума высоковольтную часть и придетекторную электронику. При этом максимально допустимое конструктивное давление газа в этих элементах детектора снижается до 1 атм.

В НИЦ “Курчатовский институт”–ПИЯФ (далее ПИЯФ) на основе многопроволочной пропорциональной камеры (MWPC – Multi-Wire

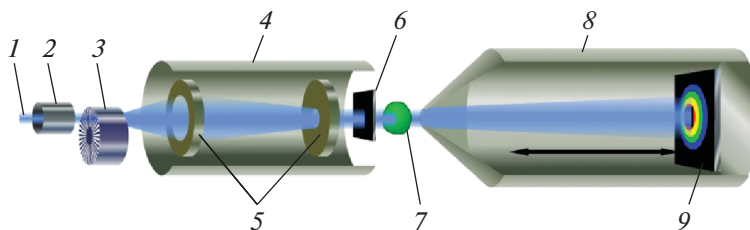


Рис. 1. Принципиальная схема дифрактометра малоуглового рассеяния нейтронов. 1 – нейтронный пучок с замедлителем; 2 – нейтроновод с заслонкой; 3 – монохроматор; 4 – коллимационная система с диафрагмами 5; 6 – мониторный счетчик; 7 – узел образца; 8 – вакуумный объем; 9 – детектор рассеянных нейтронов.

Proportional Chamber) разработан газоразрядный позиционно-чувствительный детектор (п.ч.д.) с площадью регистрации  $600 \times 600 \text{ мм}^2$ . В качестве конвертора нейтронов используется газовая смесь, содержащая  $^3\text{He}$ .

Детектор такого типа сочетает в себе высокую эффективность регистрации, низкую чувствительность к  $\gamma$ -фону источника, хорошее пространственное разрешение, широкий диапазон по площадям регистрации, стабильность рабочих характеристик и приемлемое быстродействие для большинства экспериментальных установок. Уникальность создаваемых в ПИЯФ детекторов заключается в применении специальной технологии изготовления электродов на основе сверхчистого стекла. Эта технология обеспечивает долговременное сохранение чистоты рабочего газа детектора, что существенно увеличивает ресурс работы и стабильность характеристик во времени таких детекторов по сравнению с аналогичными устройствами.

Настоящая статья посвящена описанию конструктивных особенностей п.ч.д. детектора тепловых нейтронов и регистрирующей электроники к нему.

## 2. ПАРАМЕТРЫ ДЕТЕКТОРА

Основные параметры газоразрядного детектора тепловых нейтронов представлены ниже:

Апертура, $\text{мм}^2$	$600 \times 600$
Предельные габариты, мм	до $900 \times 900 \times 200$
Число измеряемых координат	2 (X, Y)
Пространственное разрешение, мм	$3 \times 3$
Длины волн, $\text{Å}$	3–15
Газовая смесь	$^3\text{He} + \text{CF}_4$
Эффективность регистрации, %	$\geq (50-80)$
Конструкция	MWPC
Герметичность	Работа в вакууме
Чувствительность к $\gamma$ -фону (по $^{137}\text{Cs}$ )	$\leq 1 \cdot 10^{-7}$
Быстродействие детектора, н/с,	$\leq 1.5 \cdot 10^5$
(при просчетах электроники $\leq 25\%$ )	

## 3. КОНСТРУКЦИЯ ДЕТЕКТОРА

Детектор размещается в замкнутом газовом объеме и состоит из двух функциональных частей (рис. 2): 1) многопроволочной пропорциональной камеры, обеспечивающей газовое усиление первичного заряда и его локализацию; 2) двух дрейфовых промежутков, обеспечивающих требуемую эффективность регистрации нейтронов.

Конструкция MWPC для двухкоординатного детектора нейтронов состоит из пяти плоскостей электродов. В центре находится анод – сетка из

параллельных тонких проволочек W–Au диаметром 25  $\mu\text{м}$ . Симметрично относительно плоскости анода на расстоянии 3 мм расположены два катода из стальных проволочек диаметром 55  $\mu\text{м}$ , намотанных с шагом 1 мм. Проволочки каждого катода объединены в группы (стрипы) по три.

Для регистрации двух координат электронной лавины стрипы катодных плоскостей ориентированы ортогонально друг другу. Отводы стрипов соединены с линией задержки (шаг линии равен 3 нс), используемой для съема сигналов с детектора. Также внутри корпуса на расстоянии 10 мм от катодов размещены два дрейфовых катода.

При выборе материала для корпуса детектора учитывались следующие требования:

- 1) достаточная механическая прочность для заполнения газовой смесью требуемого давления;
- 2) высокое качество герметизации для сохранения стабильности давления газовой смеси;
- 3) обеспечение наибольшей трансмиссии нейтронов при минимальной вероятности перерассеяния на входном окне детектора для наибольшей эффективности регистрации без потери разрешения.

На основании ранее проведенных исследований [1] дюралевых сплавов с высокой механической прочностью для корпуса был выбран сплав В95.

Для обеспечения стабильной и долговременной работы двухкоординатного детектора в условиях замкнутого газового объема требуется сохранение чистоты рабочей газовой смеси, поэтому необходимо использовать материалы, не выделяющие примеси в его объем.

Для минимизации газовой выделенности материала детектора все электроды MWPC изготовлены из специализированного стекла с нанесенными на его поверхность металлическими ламелями для пайки проволочек. Такая технология позволяет подготовить газовый объем детектора перед заполнением его рабочим газом путем нагрева до температуры  $100-120^\circ\text{C}$  с вакуумированием. Все элементы конструкции: уплотнения, материалы изоляции, электрические компоненты, находящиеся внутри газового объема, были проверены и отобраны по минимальному газовой выделенности на вакуумном стенде с масс-спектрометром остаточных газов.

Для компонент линии задержки результаты проверки представлены на рис. 3. Из детального анализа спектров масс при различных температурах (от комнатной до  $120^\circ\text{C}$ ) было выяснено, что конденсаторы и катушки индуктивности мало “газят” при нагреве. На спектрах присутствуют массы элементов, соответствующих атмосфере ( $\text{H}_2$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$ ). Таким образом, при нагреве детектора до температуры  $120^\circ\text{C}$  газовой выделенности из конденсаторов и катушек индуктивности не произойдет.

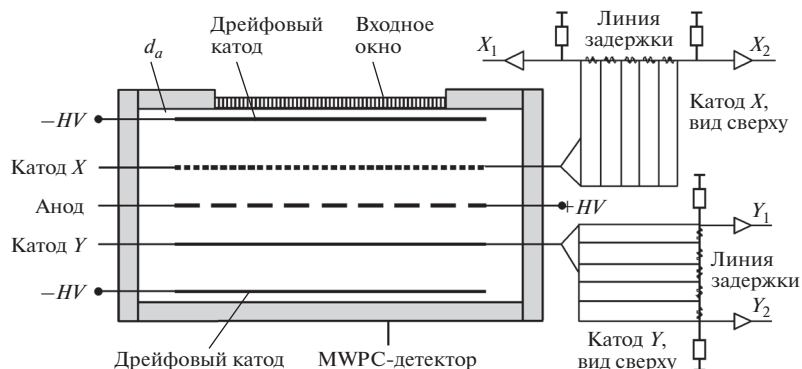


Рис. 2. Схема двухкоординатного п.ч.д.

Характеристическое сопротивление линии задержки выбрано равным 100 Ом с шагом отводов (между стрипами) 3 нс. Из-за необходимости установки линии задержки в замкнутом газовом объеме детектора без продува были использованы малогазящие компоненты:  $L = 290 \pm 5\%$  нГн тип LQ31H (типоразмер 1206) и керамические конденсаторы  $C = 27 \pm 5\%$  пФ тип GRM (типоразмер 0805).

#### 4. ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ

Технология изготовления п.ч.д. включает в себя изготовление и тестирование пакета электродов MWPC, сборку и тестирование полностью собранного п.ч.д. Пакет электродов — это многослойная структура на базе конструктивных элементов из специализированного стекла. Последовательность изготовления пакета электродов представлена на рис. 4.

Конструктивно анодный и катодные электроды представляют собой стеклянную раму, с противоположных сторон которой приклеиваются стеклотекстолитовые планки с вытравленными на них контактными ламелями. На две другие противоположные стороны электрода приклеиваются ребра жесткости в виде стеклянных планок.

Склейка анодной рамы под пайку электродов и катодных рам под пайку проволочек осуществлялась в соответствии со специально разработанной методикой. Для склейки изготавливалась смесь на основе эпоксидной смолы. Чтобы избежать растрескивания стеклянных рамок при распайке проволочных сеток (температура припоя  $310^\circ\text{C}$ , температура рамы  $120^\circ\text{C}$ ), электроды равномерно прогревались с помощью термического стола (термостол).

Для намотки проволочных электродов изготавливались проволочные сетки для катода и анода. Для достижения высокой однородности натяжения проволочек анода и катодов, а также высокой точности шага проволочек при изготовлении электродов применялась технология калибровоч-

ных гребенок с равномерным шагом, которая позволила обеспечить однородность шага проволочек не хуже  $\pm 20$  мкм.

Перед сборкой все электроды продувались ионизированным азотом, а затем поочередно устанавливались в пакет. Однородность толщины электрода в сборе должна быть не хуже 40 мкм. До установки готового пакета в корпус детектора осуществлялось его высоковольтное тестирование с использованием тестовой газовой смеси: снимались вольт-амперные характеристики и темновые токи.

Готовый корпус был проверен на соответствие фактических и геометрических параметров элементов корпуса требуемым значениям. Была измерена деформация корпуса под рабочим давлением, проведена проверка герметичности с использованием стэнда на базе гелиевого течеискателя со сверхчистым  $^4\text{He}$ .

В корпус был установлен пакет электродов и линия задержки. Выводы линии задержки и анода подключены к разъемам. Тестирование подключенного пакета электродов проводилось с применением газовой смеси  $60\%\text{Ag} + 30\%\text{CO}_2 + 10\%\text{CF}_4$  с радиоактивным источником  $^{55}\text{Fe}$ . Для подготовки газовой смеси использовались системы очистки  $\text{CO}_2$  и  $\text{CF}_4$ , а также установка по смешению этих газов.

После того как детектор был заполнен рабочей газовой смесью  $^3\text{He} + \text{CF}_4$ , осуществлялось его итоговое тестирование на измерительном стенде с использованием источника нейтронов  $^{252}\text{Cf}$ .

#### 5. ХАРАКТЕРИСТИКИ ДЕТЕКТОРА

Высокие эффективность регистрации и пространственное разрешение двухкоординатного детектора на основе MWPC определяются размерами дрейфовых промежутков и использованием газовой смеси при давлении 2–4 атм.

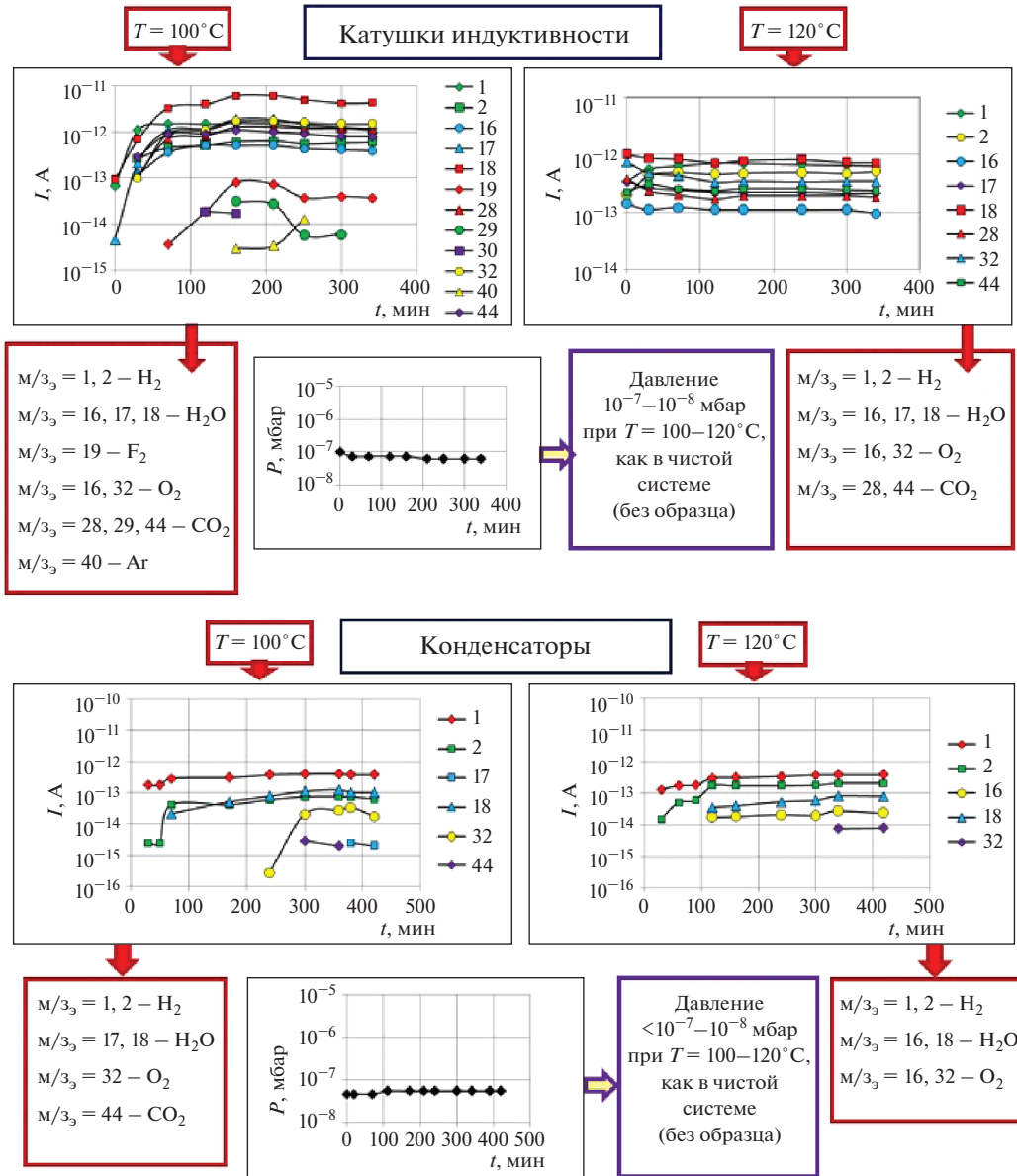


Рис. 3. Анализ спектров масс для компонент линии задержки ( $m/z_3$  – отношение массы к заряду электрона).

Собственная эффективность детектора [1, 2] определяется отношением числа актов взаимодействий к начальному числу нейтронов, падающих на поверхность детектора под нормальным углом:

$$\varepsilon = \exp[-\mu_{al}d_{al}]\exp[-\mu_{da}d_a](1 - \exp[-\mu_{Ld}d_{Ld}]), \quad (1)$$

где  $\mu_x = n_x\sigma_x$  – линейный коэффициент поглощения нейтронов в веществе;  $n_x$  – концентрация атомов вещества;  $\sigma_x$  – полное сечение взаимодействия тепловых нейтронов;  $d_{al}$  – толщина входного окна;  $d_{Ld}$  – толщина стеклянного катода в чувствительной области детектора;  $d_a$  – толщина газового зазора между входным окном и первым катодом.

Наибольшая эффективность регистрации достигается при минимизации влияния факторов неэффективности, таких как: входное окно детектора (потери  $\approx 15\%$ , сплав В95 при толщине 18 мм), газовый зазор между входным окном детектора и плоскостью первого дрейфового электрода (потери  $\approx 25\%$ ) и стекло первого (по пучку) катода (потери 4% при толщине 2 мм). Расчетная эффективность двухкоординатного п.ч.д. с входным окном  $600 \times 600 \text{ мм}^2$  для  $^3\text{He}$  представлена на рис. 5.

Пространственное разрешение детектора ограничено пробегами продуктов ядерной реакции  $^3\text{He}(n, p)\text{T}$ . Протон и тритон разлетаются в противоположные стороны из точки ядерной реакции и



Рис. 4. Последовательность изготовления пакета электродов.

из-за различных ионизационных потерь и начальных энергий частиц ( $E_p = 573$  кэВ,  $E_T = 191$  кэВ) центр тяжести зарядов облака первичной ионизации смещен относительно точки ядерной реакции на величину  $r = 0.35R_p$ , где  $R_p$  – пробег протона. Таким образом, пространственное разрешение детектора ограничено величиной  $D_{\text{ит}} = 2r = 0.7R_p$ .

Зависимость расчетного пространственного разрешения детектора от давления газа  $\text{CF}_4$  определялась выражением:

$$D_{\text{ит}} \approx \frac{3[\text{мм} \cdot \text{атм}]}{P_{\text{CF}_4}}. \quad (2)$$

Пробеги протона вычислялись в программе SRIM [3]. Для наполнения детектора выбрано давление  $P_{\text{CF}_4} = 1.5$  атм, при котором пространственное разрешение составляло  $D_{\text{ит}} = 2.0$  мм.

## 6. РЕГИСТРИРУЮЩАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

Для сбора и обработки данных с детектора с площадью регистрации  $600 \times 600$  мм<sup>2</sup> в ПИЯФ разработана система регистрации данных на основе придетекторной электроники и программного обеспечения. Подобные системы ранее неоднократно создавались для научных установок, последние разработки представлены в [4, 5].

В двухкоординатном детекторе для регистрации частиц используется катодный метод съема информации на линии задержки, что позволяет с высокой точностью определять координаты при относительно малом мертвом времени, ограниченном длиной линии задержки (~1 мкс), и при минимальном количестве регистрирующих каналов электроники – по два канала на каждый катод. Линия задержки состоит из дискретных  $L$  и  $C$  элементов, распаиваемых непосредственно на выводах катодных стрипов на раме.

Импульс, возникающий на линии задержки, идет одновременно к двум ее концам: с одной стороны сигнал поступает на канал  $X_1$  или  $Y_1$ , с другой – на канал  $X_2$  или  $Y_2$ .

Координата нейтрона вычисляется по разности времен прихода импульсов на входы TDC (Time-Digital Converter):

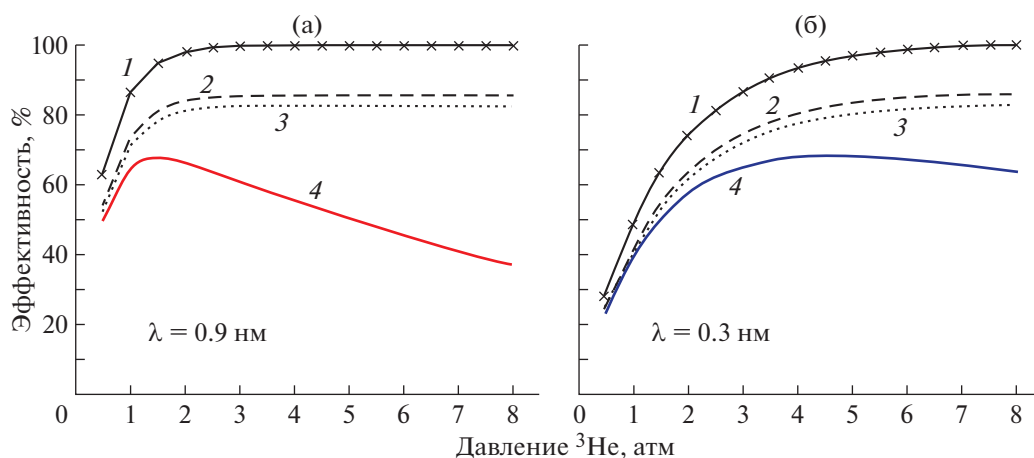
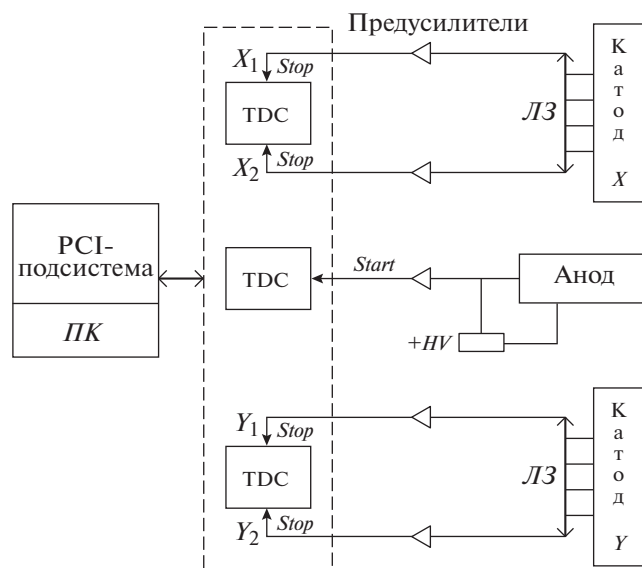


Рис. 5. Эффективность п.ч.д. для  $^3\text{He}$  для разных длин волн  $\lambda$  нейтронов. Расчетная эффективность 2D-детектора с входным окном  $600 \times 600$  мм<sup>2</sup>: 1 – эффективность конверсии нейтронов чувствительным объемом детектора (30 мм) без учета факторов ослабления пучка; 2 – сумма эффективности 1 и потерь во входном окне детектора; 3 – сумма 2 и потерь в дрейфовом катоде; 4 – сумма 3 и потерь в газовом зазоре – итоговая эффективность детектора.





**Рис. 6.** Схема регистрирующей электроники детектора. ЛЗ – линия задержки для катодов; TDC – цифровой преобразователь время–код; PCI-подсистема – две соединенные платы, размещенные в персональном компьютере ПК.

$$x = \left(1 - \frac{XT_2 - XT_1}{T}\right) \frac{L}{2}, \quad (3)$$

где  $XT_1$  и  $XT_2$  – время прихода сигналов на концы линии задержки;  $T$ , нс – длина линии задержки;  $L$  – физическая длина катода вдоль координаты  $X$ . Координата  $Y$  рассчитывается аналогично. Сложение вычисленных координат  $X$  и  $Y$  дает положение нейтрона на плоскости.

Система регистрации данных с п.ч.д. состоит из:

- предусилителей, формирующих логические импульсы с временной привязкой к входному сигналу, поступившему с выходов линий задержки и анода; каждый предусилитель включает в себя низкошумящий предусилитель, усилитель-формирователь, дискриминатор с привязкой к вершине сформированного импульса;
- TDC – преобразователя времени в цифровой код, предназначенного для распознавания события и цифрового представления времени, когда произошло событие [6];
- программного обеспечения для сбора и предварительной обработки данных.

Регистрация событий осуществляется по схеме совпадений: сигнал с анода является стартовым, запускающим TDC в режим ожидания сигналов с  $X$ - и  $Y$ -катодов. Схема регистрирующей электроники детектора представлена на рис. 6.

PCI-подсистема представляет собой две платы, соединенные через разъем: одна плата – универсальный носитель мезонинных карт с PCI-интерфейсом и локальной 16-битной шиной, вторая –

мезонинная плата, подключенная к локальной 16-битной шине носителя и выполняющая функцию цифрового 4-канального TDC. PCI-подсистема занимает один слот PCI-шины компьютера.

TDC выполнен на основе цифрового преобразователя время–код микросхемы TDC–GPX (используется в режиме 4-канального преобразователя время–код). В состав модуля также входят: микросхема FPGA (Field-Programmable Gate Array) большой степени интеграции семейства Cyclone II и одна микросхема FPGA семейства Max-V. PCI-интерфейс выполнен на основе микросхемы PCI-9030 – мост slave PCI, 16-битная локальная шина.

Для обеспечения работы PCI-подсистемы регистрирующей электроники был разработан драйвер, обеспечивающий возможность работы под управлением ОС Windows XP 10 для 32- и 64-разрядных версий ОС. Также было разработано программное обеспечение, реализующее: работу модуля в тестовом режиме; набор данных с позиционно-чувствительного детектора; сохранение данных; визуализацию данных в разных режимах, в том числе вывод 2D- и 3D-графиков, графиков данных по координатам  $X$ ,  $Y$ , графиков данных по отдельным координатам  $X_1$ ,  $X_2$ ,  $Y_1$ ,  $Y_2$  и первичную обработку данных.

Достигнуты следующие основные характеристики:

- 4 цифровых преобразователя время–код с общим стартом;
- мертвое время модуля 3 мкс;
- дифференциальная нелинейность преобразователя время–код <5%;
- число каналов преобразователя время–код до 8192;
- чувствительность преобразователя время–код от 130 пс на 1 канал;
- пропускная способность системы на основе компьютера под управлением ОС Windows XP 10 >150000 событий в секунду.

График пропускной способности системы при работе программного обеспечения под управлением ОС Windows XP 10 представлен на рис. 7.

Предусмотрены два режима накопления данных: гистограммный (online сортировка данных и построение спектров) и “списочный” (накопление исходных данных в персональном компьютере с последующей offline обработкой). Управление системой осуществляется через операционную систему с интеграцией в предустановленное программное обеспечение. В настоящее время заканчивается разработка нового TDC на базе FPGA-микросхемы большой степени интеграции семейства Cyclone V с интерфейсом 1 Гбит Ethernet, пропускная способность системы превышает 1000000 событий в секунду.

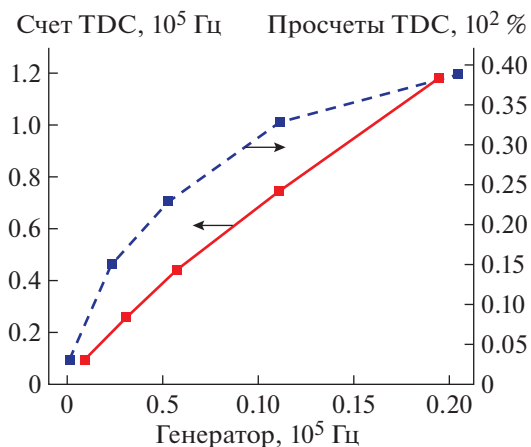


Рис. 7. График пропускной способности системы.

## 7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В НИЦ “Курчатовский институт” – ПИЯФ разработан двухкоординатный п.ч.д. с площадью регистрации тепловых нейтронов  $600 \times 600$  мм<sup>2</sup> на основе многопроволочной пропорциональной камеры. В качестве метода съема информации выбран катодный метод на LC-линии задержки, которая размещена внутри детектора. Для сбора и обработки данных разработана система регистрации нейтронов, включающая в себя придетекторную и регистрирующую электронику и программное обеспечение.

## ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России, соглашение № 075-15-2019-954 от 31.05.2019, уникальный идентификационный номер проекта RFMEFI60718X0200.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андреев В.А., Ганжа Г.А., Иванов Е.А., Ильин Д.С., Коваленко С.Н., Крившич А.Г., Надточий А.В., Рунов В.В. Препринт ПИЯФ РАН № 2780. Гатчина, 2008.
2. Andreev V., Ganzha G., Pyin D., Ivanov E., Kovalenko S., Krivshich A., Nadtochy A., Runov V. // Nucl. Instrum. And Methods A. 2007. V. 581. P. 123. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2007.07.044>
3. Biersack J.P., Ziegler J.F. SRIM – The Stopping and Range of Ions in Matter. <http://www.srim.org>
4. Глушкова Т.И., Соловей В.А., Ульянов В.А., Дьячков М.В., Колхидашвили М.Р., Савельева Т.В., Сумбатян А.А., Сыромятников В.Г. // ПТЭ. 2019. № 2. С. 19. <https://doi.org/10.1134/S0032816219020095>
5. Дьячков М.В., Соловей В.А., Ульянов В.А., Глушкова Т.И., Савельева Т.В., Колхидашвили М.Р. // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2019. № 12. С. 1. <https://doi.org/10.1134/S1028096019120069>
6. Соловей В.А., Савельева Т.В., Колхидашвили М.Р., Гапон О.Н. // ПТЭ. 2019. № 5. С. 145. <https://doi.org/10.1134/S0032816219050112>