

# АВТОМАТИЗАЦИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ КАЛИБРОВКИ ГАММА-ДЕТЕКТОРОВ В УСТАНОВКАХ МЕЧЕНЫХ НЕЙТРОНОВ

Р. Р. Бестаев

ФГУП «ВНИИА им. Н. Л. Духова», Москва

## Введение

Метод меченых нейтронов – нейтронно-радиационный метод исследования элементного состава вещества, в основе которого лежит взаимодействие 14МэВ нейтронов с веществом (рис. 1) [1, 2]. Нейтроны образуются при бомбардировке тритиевой мишени нейтронного генератора ускоренными ионами дейтерия. В результате реакции  $T(d, n) He^4$  совместно с нейтронами образуются альфа-частицы. Угол разлета нейтронов и альфа-частиц имеет фиксированное значение, близкое к  $180^\circ$ . Взаимодействие испущенных нейтронов с исследуемым образцом инициирует характеристическое ответное гамма-излучение. Регистрация альфа-частицы позиционно-чувствительным альфа-детектором определяет время  $t_{start}$  и направление испускания нейтрона. Таким образом, нейтрон становится меченым. Размеры альфа-детектора и его расположение относительно мишени определяют телесный угол вылета меченых нейтронов. В аппаратуре регистрации заложена процедура временного слежения ответного гамма-излучения после момента инициирования нейтрона  $t_{start}$ . Размеры альфа-детектора, его положение относительно мишени и временное окно слежения определяют область исследуемого пространства (инспектируемый воксель).



Рис. 1. Схема измерения мечеными нейтронами

Взаимодействие нейтронов с ядрами исследуемого вещества приводит к испусканию активационного гамма-излучения с характеристической для данного вещества энергией. Регистрация этого излучения позволяет провести элементный анализ вещества. В установках меченых нейтронов для регистрации

ответного излучения применяются сцинтилляционные гамма-детекторы в силу их высокой эффективности регистрации по сравнению с другими типами детекторов. Измерение на установке меченых нейтронов сопровождается регистрацией фона случайных совпадений. Фон случайных совпадений представляет собой зарегистрированные сигналы на гамма-детекторе во временном окне слежения, источником которых не являются ядерные реакции меченых нейтронов с ядрами инспектируемого вещества.

На рис. 2 представлены характерные спектры измерения методом меченых нейтронов образца полиэтилена в течение 3 часов. Можно выделить области фона случайных совпадений и ответного гамма-излучения образца время пролетного спектра. Области подъема и спада времяпролетного спектра вне временного окна слежения связано со спецификой работы аппаратуры. Фон случайных совпадений вычитается из интересующей области отклика образца. Энергетический спектр полиэтилена имеет характерный пик полного поглощения в области 4,44 МэВ и пик первого аннигиляционного вылета. Спектр фона случайных совпадений содержит линии элементов (алюминий, углерод, кислород и др.), окружающих установку. Для представленного примера статистика спектра случайных совпадений в 30 раз превосходит статистику спектра образца.

Метод меченых нейтронов получил применение в различных областях техники: обнаружение взрывчатых веществ в багаже, поиск неразорвавшихся боеприпасов в грунте и на морском дне, поиск алмазов в горной породе [3, 4].

## Существующие методы температурной стабилизации отклика гамма-детектора

При эксплуатации сцинтилляционных гамма-детекторов необходимо учитывать зависимость световых выхода и времени высвечивания кристалла от температуры. При изменении температуры кристалла от 0 до 40 °С длительность сцинтилляционной вспышки детектора ВГО уменьшается от 400 до 200 нс, а световых выход падает более, чем в два раза [5]. Значение температурного коэффициента изменения световых выхода зависит от типа и качества кристалла и лежит в интервале от 0.1 до 2 %/°С (наибольшие значения для детектора ВГО) [6]. Температурный эффект без специальных мер компенсации приводит к неверной калибровке и значительному повышению погрешности результатов.

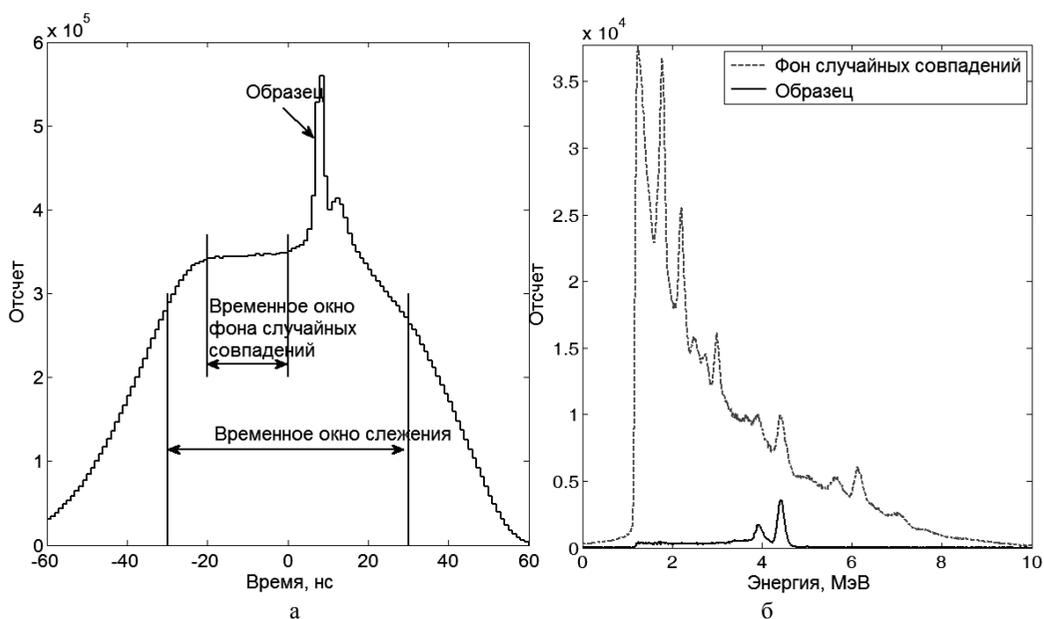


Рис. 2. Спектры метода меченых нейтронов: а – времяпролетный, б – энергетические

Были предприняты различные подходы к разработке алгоритма обработки данных измерения, учитывающего температурную зависимость световых выходов гамма-детектора. В досмотровом комплексе EURIT-RACK [7] реализована автоматизированная калибровка гамма-детектора по характерным линиям спектра образца. Такой подход имеет ряд недостатков: статистика небольших образцов может быть недостаточной для точной калибровки, характерные линии спектра могут иметь низкую интенсивность по сравнению с комптоновской подложкой для точной калибровки.

В досмотровой системе SENNA [8] реализован алгоритм автоматизированной калибровки по характерным линиям спектра фона случайных совпадений. Регистрация фона случайных совпадений в методе меченых нейтронов является сопутствующим процессом каждого измерения. Использование этого спектра целесообразно из-за его высокой статистики (по сравнению со спектром образца). Калибровка осуществляется по характерным линиям железа и углерода – веществ, используемым в конструкции установки. В досмотровой системе УВП-1103 [9] реализован двухэтапный алгоритм калибровки. На первом этапе по спектру фона случайных совпадений проводится «грубая» калибровка. На втором этапе по характерным линиям кислорода и кремния в спектре фона случайных совпадений рассчитываются коэффициенты калибровки. Таким образом, для реализации алгоритма требуется наличие в установке маркерных элементов (кислород и кремний). Данные подходы имеют недостаток, связанный с возможным наложением на интересные линии углерода и железа (SENNA) или кислорода и кремния (УВП-1103) линий меди, цинка, кальция и других элементов, содержащихся в окружающей установку конструкциях, что приведет к повышению погрешности калибровки.

Автоматическая система компенсации температурного изменения световых выходов была реализована в установке PELAN [10]. Постоянство отклика детектора достигалось за счет изменения коэффициента усиления канала регистрирующей электроники в зависимости от температуры кристалла с учетом измеренной зависимости его световых выходов [11]. Точность стабилизации отклика в данном методе составила 7 % при изменении температуры от  $-5$  до  $45$  °С. Недостатком данного способа является методическая сложность. Она заключается в необходимости проведения предварительных климатических исследований и вычисления поправочной функции, а также в необходимости измерения температуры детектора при эксплуатации установки меченых нейтронов. Кроме того, данный способ не является универсальным по отношению к различным типам сцинтилляторов. Зависимость световых выходов от климатических условий специфична для типа сцинтиллятора. Поэтому использование различных детекторов гамма-излучения потребует методического сопровождения для каждого детектора. Известен метод компенсации климатических эффектов на основе амплитудной поправки [12]. В этом методе температурная поправка реализуется на программном уровне: с помощью поправочной функции пересчитываются значения зарегистрированных амплитуд откликов. При этом методическая сложность реализации сохраняется. Температурная компенсация отклика на основе амплитудной поправки реализована в досмотровом комплексе ДВиН [13]. Погрешность стабилизации в данной установке составляет 1 % в диапазоне температур от  $16$  до  $30$  °С [12].

Существующие подходы автоматизации калибровки, учитывающие изменения температуры детектора, имеют ряд ограничений, связанных с точностью и методической сложностью реализации.

## Алгоритм калибровки гамма-детекторов на основе спектра случайных совпадений

Спектр – это дискретное представление числа отсчетов по шкале каналов  $Asc$  или энергий  $Esc$ . Подготовительным этапом алгоритма калибровки является предварительное измерение энергетического спектра фона случайных совпадений высокой статистики (стандартный спектр). Статистика стандартного спектра должна быть на порядок выше статистики спектров, набираемых в ходе рутинных измерений. Для этого спектра следует реализовать кусочно-линейную интерполяцию (вид интерполяции, при которой значения между соседними дискретными точками спектра задается отрезком, соединяющим эти точки) и, таким образом, определить кусочно-линейную функцию случайных совпадений  $F(E)$ . Под функцией здесь понимается непрерывное представление числа отсчетов для значения энергии  $E$ .

При эксплуатации установки в ходе каждого измерения определяется аппаратный спектр фона случайных совпадений  $R(Asc)$ . Для пересчета аппаратного спектра в энергетический спектр требуется знать значения коэффициентов калибровки. Алгоритм вычисления коэффициентов калибровки гамма-детекторов основан на аппроксимации измеренного спектра  $R(Asc)$  функцией  $F(E)$  (1). Результатом аппроксимации являются коэффициенты  $(k, b)$  пересчета каналов аппаратного спектра в энергию, которые представляют собой коэффициенты калибровки.

$$\sum_i (R_i - F(k \cdot Asc_i + b))^2 \rightarrow \min, \quad (1)$$

где,  $Asc$  – шкала аппаратного спектра в каналах,  $F$  – функция энергетического спектра случайных совпадений,  $R$  – аппаратный спектр фона случайных совпадений,  $k, b$  – коэффициенты аппроксимации.

В связи с тем, что температурные условия эксплуатации установки могут отличаться от условий измерения стандартного спектра, перед аппроксимацией требуется определить нижнюю и верхнюю границы аппаратного спектра, в пределах которых следует проводить аппроксимацию. Эта процедура необходима в силу смещения аппаратного спектра вдоль шкалы при изменении температуры регистрирующей аппаратуры.

Расчет верхней и нижней границы аппаратного спектра основан на сопоставлении статистики аппаратного спектра  $R$  и функции случайных совпадений  $F$ . Статистика спектра представляет собой нормированное число зарегистрированных отсчетов и задается формулой:

$$S = \frac{Nt}{I^2 \Delta t}, \quad (2)$$

где,  $N$  – число зарегистрированных отсчетов во временном окне фона,  $t$  – время измерения,  $I$  – число испущенных генератором нейтронов во время измерения (определяется по числу зарегистрированных

альфа-частиц),  $\Delta t$  – ширина временного окна фона случайных совпадений.

Далее вычисляется параметр невязки:

$$p_S = \frac{S_1 - S_2}{S_1}, \quad (3)$$

где  $S_1, S_2$  – статистика стандартного спектра и аппаратного спектра соответственно. Параметр невязки является количественной оценкой изменения статистики за счет смещения аппаратного спектра. В случае соответствия температур данного измерения и стандартного измерения статистики  $S_1$  и  $S_2$  равны, а невязка  $p_S = 0$ .

По параметру невязки рассчитывается нижняя граница аппаратного спектра:

$$L_{S2} = L(p_N = p_0 + p_S), \quad (4)$$

где  $L$  – значение нижней границы (в каналах) спектра фона случайных совпадений. Параметр  $p_0$  вводится для устранения около пороговой области спектра, так как вблизи порога спектра возможны значительные статистические флуктуации отсчетов (задается на уровне  $p_0 = 10-20\%$ ). Условие вычисления нижней границы ( $p_N = p_0 + p_S$ ) заключается в вычислении такого значения канала  $L$ , при котором доля отсчетов  $p_N$  спектра фона ниже этой границы  $L$  по отношению к общему количеству отсчетов станет равной доле  $p_0 + p_S$ . Таким образом, стандартный спектр охватывает более широкую область низкоэнергетических откликов.

Верхняя граница стандартного спектра определяется из условия отсечения некоторой доли высокоэнергетических откликов (на уровне 1% от общего количества), не представляющих интерес. Верхняя граница спектра фона случайных совпадений определяется из условия отсечения не меньшей доли по сравнению со стандартным спектром высокоэнергетических откликов. Последнее условие связано с требованием обеспечения более широкого охвата откликов для стандартного спектра по сравнению со спектром фона случайных совпадений. Требование более широкого охвата откликов стандартным спектром связано с обеспечением возможности сопоставления значений спектров при варьировании коэффициентов аппроксимации  $k, b$ .

На рис. 3 представлен пример аппроксимации спектра фона случайных совпадений для измерения длительностью 0,5 мин. Характерные линии и комптоновская подложка спектров удовлетворительно согласуются. Погрешность аппроксимации для данного примера составляет 0,14% для коэффициента калибровки  $k$ .

### Апробация алгоритма калибровки

Испытания автоматизированной системы калибровки гамма-детекторов проведены на досмотровой системе меченых нейтронов. Условия проведения испытаний представлены в табл. 1. Геометрия эксперимента представлена на рис. 4. Для испытания

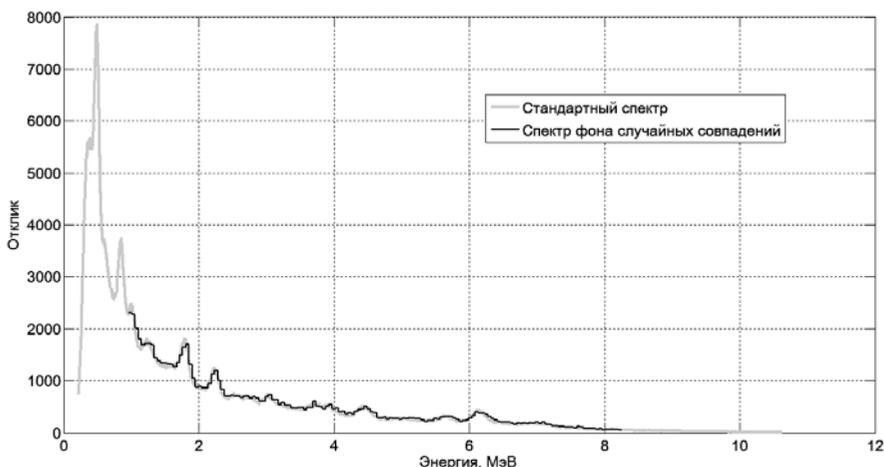


Рис. 3. Аппроксимация спектра фона случайных совпадений стандартной функцией

выбраны четыре типа образцов, которые располагаются перед досмотровой системой в определенных инспекционных вокселях. В табл. 1 указаны номера вокселей, в которых располагаются образцы. Образцы размещены таким образом, что каждый из них находится в области одного инспектируемого вокселя. Для проведения испытания при низкой и высокой температурах детектора, он в течение 2 часов выдерживался в термостатическом состоянии, после этого устанавливался в досмотровую систему. Совокупное время измерений заданной температуры детектора составляло 15 мин.

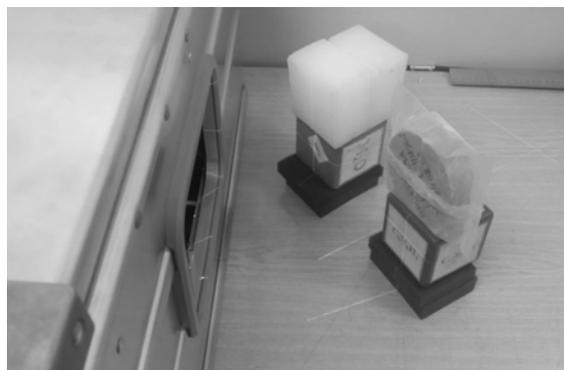


Рис. 4. Геометрия испытаний алгоритма калибровки

Таблица 1

Условия проведения испытаний системы калибровки

Параметр	Значение
Источник нейтронов	ИНГ-27
Поток нейтронов, н/с	$5 \cdot 10^7$
Детектор	BGO, $H \times \varnothing = 5,08 \times 5,08$ см
Значения температуры детектора	14 °C    28 °C    40 °C
Время измерения, мин	0,5
Число измерений для заданной температуры детектора	30
Список веществ, масса, номер $\alpha$ пикселя	Полиэтилен 0,6 кг, $\alpha = 4$ Меламин 0,55 кг, $\alpha = 9$ Вода 0,5 кг, $\alpha = 7$ Имитатор тетрила 0,3 кг, $\alpha = 6$

Для каждого измерения получен аппаратный спектр фона случайных совпадений. Далее по стандартному спектру проводится аппроксимация. На основе серий измерений при различных температурах гамма-детектора оценены средние значения коэффициента калибровки  $k$ . Коэффициенты калибровки при разных температурах детектора представлены в табл. 2.

Таблица 2

Коэффициенты калибровки при разных температурах детектора

Температура детектора	14 °C	28 °C	40 °C
Коэффициент калибровки	$3,788 \pm 0,006$	$4,056 \pm 0,015$	$4,538 \pm 0,006$

На основе коэффициентов калибровки вычисляется энергетический спектр образца. На рис. 5 представлены спектры исследуемых образцов для серии климатических испытаний. Статистика спектров полиэтилена и воды выше имитатора тетрила и меламин в силу более близкого расположения образцов к гамма-детектору. Спектры образцов различных температур детектора хорошо согласуются.

Спектр углерода используется для оценки погрешности температурной компенсации разработанного метода. На рис.6 представлены положения пика углерода для серии климатических измерений. Значительная погрешность в определении положения пика углерода связана с низкой статистикой спектра за 0,5 мин измерения. По результатам оценки положения пика углерода оценены взвешенные средние и погрешности среднего для данной температуры. Погрешность температурной компенсации (среднеквадратическое отклонение) не превышает 0,3 %.

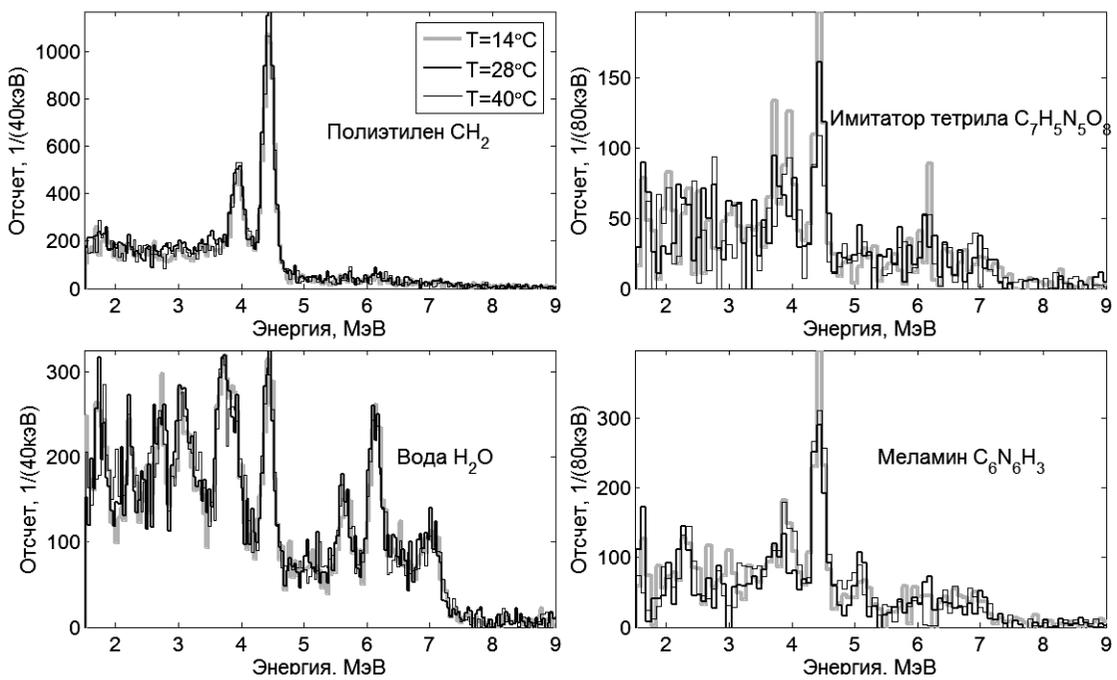


Рис. 5. Спектры образцов серии климатических испытаний (объединение спектров данной температурной серии измерений)

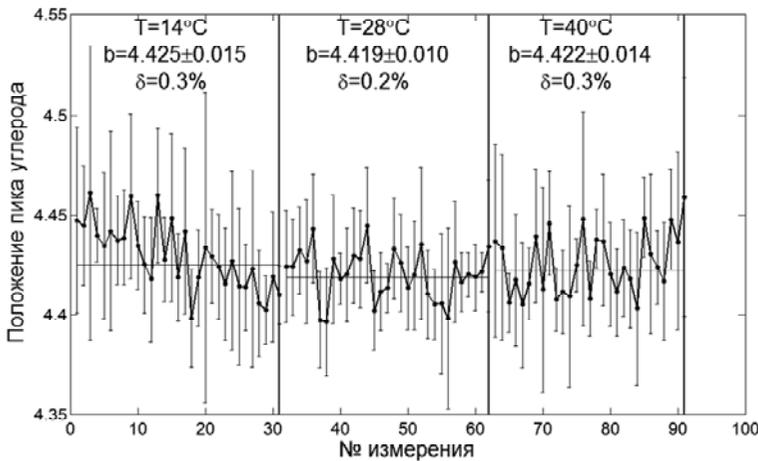


Рис. 6. Положение пика углерода в серии климатических испытаний

## Заключение

Таблица 3

Разработан алгоритм автоматизированной калибровки гамма-детекторов по спектру фона случайных совпадений. Проведены температурные испытания системы калибровки. Погрешность температурной компенсации разработанной система составляет 0.3%. Погрешность температурной компенсации определяет минимально достижимую ширину шага энергетической шкалы:

$$\Delta E = \delta E \cdot 4,44 \text{ МэВ} \quad (5)$$

где,  $\delta E_0$  – погрешность температурной компенсации. Ширина шага определяется по гамма-линии 4,44 МэВ углерода.

В табл. 3 представлены достижимые ширины энергетической шкалы различных систем температурной стабилизации.

Минимально достижимая ширина энергетической шкалы

Система	PELAN	ДВиН	Аппроксимация фона случайных совпадений
$\Delta E$ , кэВ	310	44	13

В качестве критерия применимости температурной стабилизации отклика детектора можно принять предельную ширину энергетической шкалы  $\Delta E_{\text{предел}}$ . Для детектора ВГО энергетическое разрешение составляет  $\eta = 10\%$  для линии 662 кэВ  $^{137}\text{Cs}$  [14]. Предельную ширину энергетической шкалы можно определить через число интервалов для описания пика полного поглощения гамма-линии углерода 4,44 МэВ. Если задать 10 интервалов для описания пика, предельная ширина энергетической шкалы составит:

$$\Delta E_{\text{предел}} = \text{ПШПВ}_{4,44\text{МэВ}}/10 = 17 \text{ кэВ} \quad (6)$$

Исходя из значений  $\Delta E$  и  $\Delta E_{\text{предел}}$  следует, что допустимым способом температурной компенсации является разработанный алгоритм калибровки на основе аппроксимации спектра случайных совпадений стандартным спектром.

### Литература

1. Хасаев Т. О. и др. Нейтронный генератор ИНГ-27 – малогабаритный источник меченых нейтронов для аппаратуры элементного анализа. Сборник докладов международной научно-технической конференции Портативные генераторы нейтронов и технологии на их основе. –М.: ВНИИА им. Н. Л. Духова, 2013.

2. Chichester D. L., Lemchak M., Simpson J. D. The API 120: A portable neutron generator for the associated particle technique. NIM B, T. 241, P. 753–758, 2005.

3. Smith R. C., Hunvitz M. J., Tran K.-C. System to detect contraband in cargo containers using fast and slow neutron irradiation and collimated gamma detectors. NIM B, 1995.

4. Perot B. et. al. Materials Characterisation with the Associated Particle Technique. 2012 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference Record (NSS/MIC).

5. Globus M., Grinyov B., Kim J. K. Inorganic Scintillators for Modern and. Kharkiv: Institute for Single Crystals, 2005.

6. <http://www.gammadata.se/assets/Uploads/BGO-data-sheet.pdf>

7. Carascoet C. et al. In-field tests of the EURIT-RACK tagged neutron inspection system. NIN A, T. 588, P.397–405, 2008.

8. Kuznetsov et. al. SENNA – Device for Explosives' Detection Based on Nanosecond Neutron Analysis. Proc. of SPIE Vol. 6213, 621306-1. 2006.

9. Бабин Г. В., Халимов В. И. Программный комплекс для получения и анализа данных в измерительных системах с использованием источника меченых нейтронов. С.-П. : V научно-техническая конференция студентов, аспирантов, молодых ученых, приуроченная к 80-летию проф. кафедры органической химии СПбГТИ (ТУ) Б. И. Ионина и открытию НИЛ «Каталитические технологии», 2015.

10. Sullivan R. An Advanced ESTCP PELAN System for Surface and Nearsurface. 2007.

11. Womble P. C. et. all. PELAN 2001: Current Status of the PELAN Explosive. Proceedings SPIE conference on Hard X-Ray and Gamma-Ray Detector Physics, 2001.

12. Быстрицкий В. М. и др. Гамма-детекторы в установках по обнаружению взрывчатых и наркотических веществ // Сборник докладов международной научно-технической конференции. Портативные генераторы нейтронов и технологии на их основе. 2013.

13. В. М. Быстрицкий и др. Стационарный досьмотровый комплекс ДВиН-2. Письма в ЭЧАЯ. 2009.

14. BGO Bismuth Germanate Scintillation Material. BGO-Data-Sheet.pdf. [www.detectors.saint-gobain.com](http://www.detectors.saint-gobain.com).