

ЭЛЕМЕНТЫ АВТОМАТИЗАЦИИ ЭКСПЕРИМЕНТОВ НА УСТАНОВКЕ ДУБНЕНСКИЙ ГАЗОНАПОЛНЕННЫЙ СЕПАРАТОР ЯДЕР ОТДАЧИ

*Ю. С. Цыганов*¹

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Рассматриваются схемы, программные продукты и их реализация в среде Builder C++ для экспериментов по синтезу сверхтяжелых элементов (СТЭ) на установке дубненский газонаполненный сепаратор ядер отдачи (ГНС) ЛЯР им. Г. Н. Флерова ОИЯИ. Приведены примеры применения в реакциях полного слияния с ионами ^{48}Ca .

Schematics, codes and Builder C++ applications aimed at the synthesis of superheavy elements at the Dubna gas-filled recoil separator (DGFRS) of FLNR (JINR) are presented. Examples of applications in the heavy-ion-induced nuclear reactions with ^{48}Ca projectiles are presented.

PACS: 29.30.Kv

ВВЕДЕНИЕ

Успех экспериментов по синтезу сверхтяжелых ядер на установке ГНС [1–3], а также ряд подтверждающих экспериментов, как, например, [4], был бы невозможен без ряда технических решений в области автоматизации физических экспериментов на пучке тяжелых ионов. Разумеется, это не умаляет вклада ряда других составляющих успеха, таких как получение интенсивных пучков тяжелых ионов, надежность конструкций радиоактивных мишеней, высокая чувствительность детектирующих систем [5] и других. И, конечно же, применение тех или иных систем автоматизации физических установок предполагает наличие аналогичных систем общелабораторного назначения [6]. В то же время фундаментальное отличие от последних заключается именно в учете специфики ядерно-физического эксперимента по поиску редких событий распада и при работе с уникальными мишенными устройствами и материалами [7].

¹E-mail: tyura@sungns.jinr.ru

1. ИНТЕГРИРОВАННАЯ СИСТЕМА ДЕТЕКТИРОВАНИЯ-ЗАЩИТЫ-МОНИТОРИНГА ПАРАМЕТРОВ ЭКСПЕРИМЕНТА УСТАНОВКИ ГНС ЛЯР ОИЯИ

Говоря об автоматизации долговременных экспериментов по поиску редких событий распада (обычно α -распад, спонтанное деление, SF), следует иметь в виду, что в данном конкретном случае реализуется выполнение ряда таких функций, как:

- набор спектрометрических данных в режиме «событие за событием»;
- мониторинг и протоколирование технологических (не спектрометрических) параметров эксперимента;
- защита установки и отдельных уникальных узлов от несанкционированных ситуаций;
- непрерывное измерение энергии пучка циклотрона У-400 ЛЯР ОИЯИ (выделено в силу особой значимости);
- поиск в реальном масштабе времени корреляций типа ядро отдачи – α -распад (ER- α) с последующим быстрым прерыванием процесса облучения мишени на короткий временной интервал (метод «активных корреляций») для радикального подавления фона;
- создание и эксплуатация стенда (и, соответственно, разработка программного обеспечения) тестирования вновь вводимых в эксплуатацию электронных модулей, включая

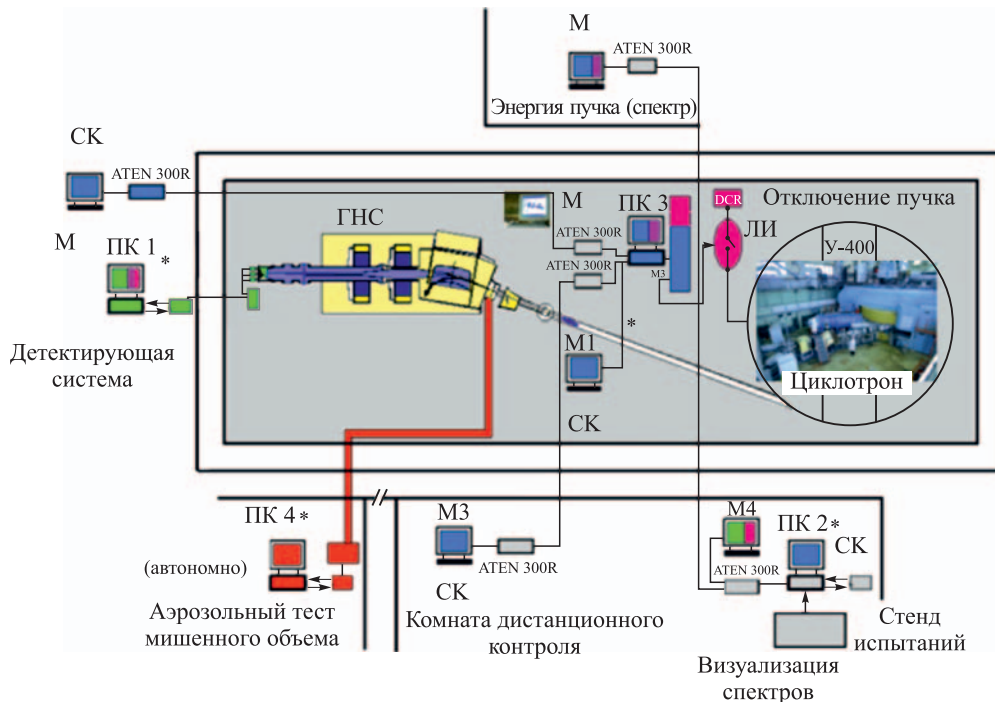


Рис. 1. Система детектирования-мониторинга-защиты установки ГНС (схематика, ПК — персональный компьютер, М — монитор, СК — система контроля). Отключение пучка — линия инъекции в циклотрон (ЛИ). * — наличие крейт-контроллера КАМАК

программы и электронные тесты, моделирующие (также и численно) специфические для данных экспериментов явления.

Перечисленным выше функциям и отвечает интегрированная¹ система детектирования-мониторинга-защиты установки ГНС [8]. На рис. 1 она представлена схематически. Для измерений применяется модернизированная версия контроллера КК-012М (PCI) [9]. Поскольку аппаратная часть данных систем описана ранее (например, [10, 11]), то в данной работе автор останавливается в основном на описании специфики программных продуктов.

Ниже рассматривается современный статус системы детектирования и соответствующей программы набора Writer.exe в случае применения многострипового DSSSD (Double Side Silicon Strip Detector), произведенного фирмой «Micron Semiconductors» (Великобритания). Отметим, что более ранняя версия системы предусматривала применение позиционно-чувствительного (всего 32 резистивных стрипа) PIPS-детектора Canberra NV (Бельгия). Программа обеспечивает накопление файловой информации в формате «событие за событием» (событие — четырнадцать 16-битных слов). Кроме этого программа обеспечивает поиск в реальном масштабе времени потенциальных корреляций ER- α (ядро отдачи – α -распад) для быстрого отключения пучка циклотрона У-400 на заранее заданный интервал времени. Данный интервал продлевается программой автоматически в случае обнаружения в том же стрипе сигнала, который может рассматриваться как кандидат на дочерний альфа-распад в фазе «вне пучка». В этом случае параметры останова задаются в виде входного текстового файла paramstop.txt, который должен находиться в той же директории, что и программа набора спектрометрических данных Writer.exe. В табл. 1 приведен типичный список параметров. После редактирования задания на эксперимент параметры актуальны для программы набора-поиска корреляций при открытии нового файла набора (перезапуска программы). Корреляции, вызвавшие останов пучка циклотрона, периодически записываются в файл EVR_ALFA.txt в формате

7	27	20	28	5712.4	3615	10072.1	10130.1	3851.015662	0.290014	578	0	827874
8	12	23	42	5431.7	3638	10048.8	10090.4	448.363762	0.962131	578	0	1250321
18	9	5	48	14796.8	4013	10868.4	10953.9	976.140826	0.003307	578	0	1759924
7	10	20	45	5408.3	3869	10787.4	10821.8	3138.195836	0.619653	578	0	2818070
19	15	8	36	7403.3	3659	10203.2	10162.6	2309.559915	0.000089	578	0	3193530.

Здесь колонки 1, 2 — порядковые номера «электронных» стрипов (1... 48, 1... 128 — без учета разводки), колонки 3, 4 — их фактическое (физическое) значение, колонка 5 — энергия ядра отдачи, далее канал времени пролета, энергии сигнала, имитирующего альфа-распад для передних и задних стрипов, файловое (текущее) время (с), разница времен ядро отдачи – альфа-распад, номер файла, 0/1 — нормальный или двойной сигнал по задним стрипам, время синхронизации (мкс) для связи событий в основном (фокальном) и боковом детекторе. Визуализация спектров происходит в комнате дистанционного контроля эксперимента [12]. Контроль стабильности аппаратуры (прежде всего температурный) осуществляется при помощи программы OFL.exe, позволяющей автоматически находить два характерных пика (центры тяжести) в области $\sim 5,5$ МэВ.

¹ Автор применяет выражение «интегрированная», имея в виду, что: а) все программные продукты соответствуют одной среде C++ Builder; б) имеет место разнообразие типа измеряемых величин.

Таблица 1. Основные параметры BuilderC++ кода Writer.exe

Параметр кода Writer.exe	Значение	Комментарий
K_prolong	5	Коэффициент продления фазы «вне пучка»
Dt_min	1,02 с	Максимальное время корреляции ER- α
MINALFA	7000,0 кэВ	Минимальная энергия для зачета как α -частица
EA_MIN	9798,0 кэВ	Нижняя граница энергий α -распада при поиске корреляции с ядром отдачи
EA_MAX	11500,0 кэВ	Верхняя граница
D_ENERGY	650 кэВ	Максимально допустимая разница по отношению к стрипам заднего контакта (DSSSD, 128 стрипов)
MIN_CHAN	1300	Порог рассмотрения поиска кандидата на корреляцию в каналах АЦП
ER_MIN	5000,0	Минимальная энергия ядра отдачи
ER_MAX	18000,0	Максимальная энергия ядра отдачи
EMIN_NEXT	8500,0	Минимальная энергия α -распада для продления фазы «вне пучка»
EMAX_NEXT	11500,0	Максимальная энергия α -распада для продления фазы «вне пучка»
NDL	60 с	Пауза в облучении
TOF_MIN	1000	Нижняя граница величины времени пролета для ядра отдачи, каналы АЦП
TOF_MAX	3500	Верхняя граница величины времени пролета для ядра отдачи, каналы АЦП
DE_MIN1	170	Порог идентификации «ядро отдачи» для сигнала ΔE (старт)
DE_MIN2	120	Порог идентификации «ядро отдачи» для сигнала ΔE (стоп)

Применение метода «активных корреляций» в случае использования DSSSD-детекторов неизбежно влечет такую особенность, как необходимость учета краевых явлений для стрипов, соответствующих $p-n$ -переходу. Отметим, что для омических контактов (стрипов) детектора этот эффект подавлен наличием «охранного» межстрипового p^+ -слоя [13].

Механизм учета, кратко, заключается в следующем: программа Writer в случае обнаружения двух сигналов в соседних задних стрипах производит калибровку и вычисление значения текущей энергии для суммы двух сигналов. Только в случае, если эта величина не превосходит значение параметра D_ENERGY и выполнены остальные условия для ядра отдачи, происходит запись параметра текущего времени в оба матричных элемента матрицы ядер отдачи (ниже фрагмент кода RECOIL [48][128] содержит/запоминает энергию ядра отдачи, t-elapsed — текущее время, twin_signal == true соответствует двойному сигналу, twin_signal=true, если есть сигнал в соседнем стрипе):

```

if (strip >= 0 && strip < 48 && strip_act >=0 && strip_act < 128 && EVR ==true ){
    MATRIX[strip][strip_act]=t_elapsed; RECOIL[strip][strip_act]=energy;
    if (twin_signal==true && strip_act > 0 && strip_act < 127){
        MATRIX[strip][strip_act+1]=t_elapsed; RECOIL[strip][strip_act+1]=energy;
        MATRIX[strip][strip_act-1]=t_elapsed; RECOIL[strip][strip_act-1]=energy;} }

```

Соответственно, при регистрации сигнала α -распада сравнение времен идет по принципу «ИЛИ». Если это соответствует успеху ($< dt_{min}$), то происходит останов процесса облучения мишени. Отметим, что типичное значение относительного количества сигналов, регистрируемых двумя соседними стрипами со стороны $p-n$ -перехода, может достигать 20% в том случае, если геометрия излучателя близка к 2π . Что же касается той части общей системы, которую относят к мониторингу параметров и защите от несанкционированных ситуаций [11], то основная идея ее создания заключалась в максимальной автономии электронных модулей, ответственных за отключение пучка в случае возникновения аварийной (нештатной) ситуации и независимости их действий от мгновенного состояния исполняемой ПК программы (в настоящее время программа Monitor_2014.exe). Роль же программы мониторинга/защиты при этом более пассивна, а именно: отображение текущего состояния параметров эксперимента и интерактивная выдача экспериментатором разрешений на активные действия модулю защиты в крейте (нажатие клавиши мыши — постановка, следующее — снятие режима, рис. 2). Не все контролируемые параметры и их выход из заранее заданного диапазона вызывают отключение пучка, некоторые (например, давление пентана в TOF-модуле и др.) вызывают действия, лишь сигнализирующие

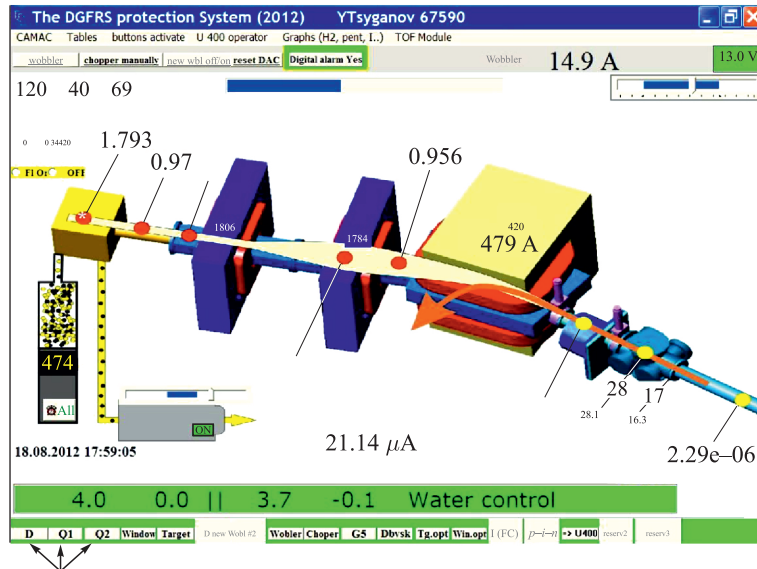


Рис. 2. Интерфейс пользователя. Кнопки постановки на активный контроль — нижний регистр кнопок (показано стрелками — дипольный магнит (D) + две квадрупольные линзы (Q1, Q2); 21,14 мкА — ток на цилиндре Фарадея, 479 А — ток дипольного магнита и 420 А — предел срабатывания блока защиты — постановка значения из программы через ЦАП крейта)

об отклонении, например изменение цвета индикации и звуковые сигналы мультимедиа. Именно этот принцип, как показала практика применения системы в конкретных экспериментах, и приводит к высокой надежности отслеживания нежелательных изменений в ходе длительных экспериментов. Иногда применяется двойной контроль, в том смысле, что для контроля определенного процесса, например вращения рамки радиоактивной мишени, могут использоваться датчики разной природы. В нашем случае для контроля вращения применяются как сигналы электромеханической природы, так и оптические датчики вращения фотодиод–светодиод (соответственно, расширение .ort на кнопках нижнего регистра, рис. 2, табл. 2).

Таблица 2. Контролируемые параметры, реакция системы

Параметр	Реакция	Типичный диапазон	Примечание
Давление пентана (ТОФ-камера), Торр	ЗЦ	0,8–1,9	Проток
Давление водорода (сепаратор), Торр	ЗЦ	0,7–1,3	Проток
Вращение рамки мишени, об./с	ЗЦО	22–30	Оптические + электромеханические датчики
Вращение рамки входного окна сепаратора, об./с	ЗЦО	15–20	Оптические + электромеханические датчики
Ток дипольного магнита, А	ЗЦО	280–550	—
Ток магнитных линз 1, 2, А	ЗЦО	1000–2000	—
Загрузка детектора фокальной плоскости, с ⁻¹	ЗЦ	$1 - n \cdot 10^3$	—
Загрузка трактов старт/стоп	ЗЦ	$10-10^3$	—
Ток обмотки воблера пучка циклотрона, А	ЗЦО	10–25	—
Вакуум перед сепаратором, Торр	Ц	$10^{-5}-10^{-7}$	—
Вакуум в камере сепаратора, Торр	Ц	10^2-10^{-5}	При откачке-настройке
Энергия пучка, МэВ	Ц	$100 - n \cdot 10^2$	—
Ток цилиндра Фарадея сепаратора, мкА	ЗЦ	0,01–35	—
Давление насыщенных паров пентана, Торр	Ц	100–500	Грубо, не лучше 20 %
Температура корпуса насоса прокачки пентана, °С	Ц	10–50	—
Амплитуда сигнала фотодиода рамки вращения мишени	Ц	300–600	Каналы АЦП 10 бит
Давление в контуре водяного охлаждения магнита, атм	ЗЦ	0–5	—
Последнее время корреляции ER- α	—	—	Дд. мм. гггг Чч. мм. сс

Примечание. З — звук; Ц — цвет (изменение); О — отключение пучка циклотрона.

Что же касается подсистемы измерения энергии (см., например, [11]), то ее значимость определяется тем, что исследуемые реакции, как правило, имеют ярко выраженный резонансный характер по параметру энергии пучка циклотрона. Отклонение в несколько МэВ приводит к резкому падению выхода исследуемого изотопа. Метод основан на измерении некоторой малой добавки по шкале времени пролета при прохождении ступков пучка тяжелых ионов между двумя пикап-электродами. При этом искомая величина времени пролета находится расчетно-измерительным методом с учетом прецизионного измерения значения частоты СВЧ-генератора циклотрона. Разумеется, к измерительному спектрометрическому тракту измеряемого времени пролета предъявляются высокие требования по стабильности. На рис. 3, а показан тест с генератором точной амплитуды

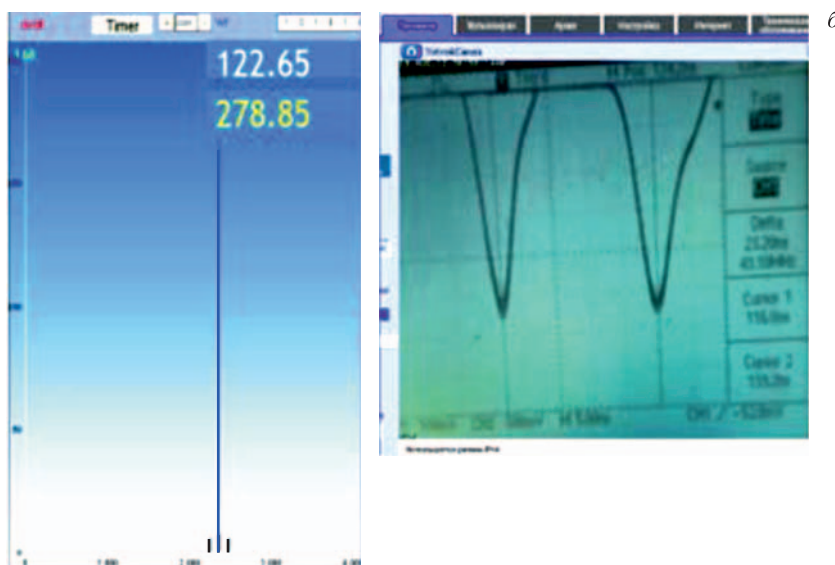
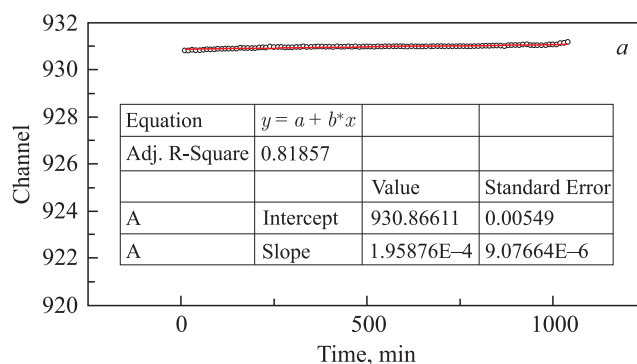


Рис. 3. а) Измерение-тест для АЦП ПА-25 тракта измерения энергии циклотрона. б) Измерение энергии циклотрона У-400 (текущее — 278,85 МэВ). Правое окно — соответствующие сигналы с пикап-электродов (пересчет энергия–время пролета: $E = 44658.307 * (1.0/\sqrt{\text{fabs}(1.0 - 186.125214/\text{TOF}/\text{TOF})} - 1.0)$). // C++

для АЦП ПА-25К [14]. Измеренное значение величины стандартного отклонения не превышало $6 \cdot 10^{-3}$ канала на уровне среднего значения амплитуды 931.

Рис. 3, б демонстрирует реальный спектр измеряемой величины времен пролета и вычисленное значение энергии пучка циклотрона (цифры в верхней части). Отметим, что все измеренные значения протоколируются программой с частотой 5 мин. Фрагмент кода, соответствующего процедуре измерения, представлен ниже в формате языка для устройства «Заряк» контроллера КК-012М (PCI) [9].

```
object JvHLEditor1: TJvHLEditor
  'n =9'  'a = 0'  'reg1 = 0xFFFF'  'r1=0'  'w_cnaf r0,10'  ''
  'loop:'
  ' r_cnaf r0,КК009(n,a,8)           // check LAM -F8'
  ' jnb 1,r0,$-1 // bit 1 absent'
  ' r_cnaf r0, КК009(n,a,2)         // Read ADC'
  ' fifo r1,r0                      // write to fifo R1R0' ' r1++           // increment r1'
  ' jmp loop'
  'end.'  ''
End
```

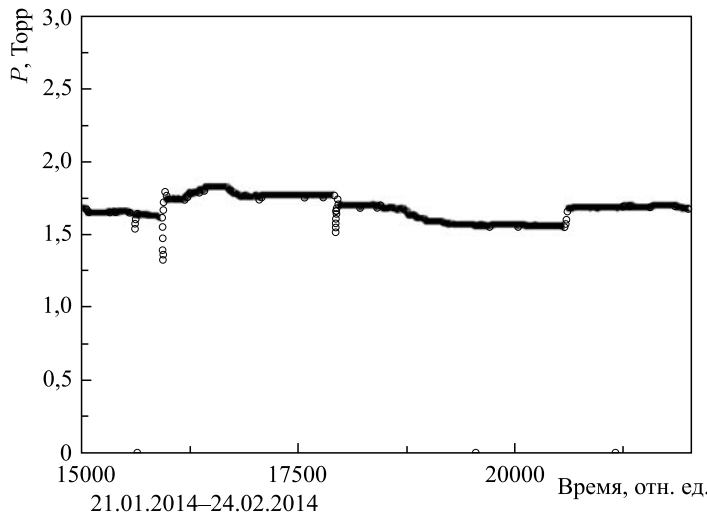


Рис. 4. График зависимости давления пентана в камере времяпролетного модуля системы детектирования от времени

В качестве еще одного примера работы системы в эксперименте по синтезу изотопов СТЭ на рис. 4 приведен график измерения давления пентана в камере времяпролетного модуля.

2. ПРИМЕРЫ ТЕСТОВ ЭЛЕКТРОННЫХ МОДУЛЕЙ

2.1. Программа off_t.exe. Она предназначена для исследования вводимых в эксплуатацию модулей, стабильности тех или иных характеристик, в том числе исследования долговременной температурной нестабильности отдельных усилительных блоков. На рис. 5, а

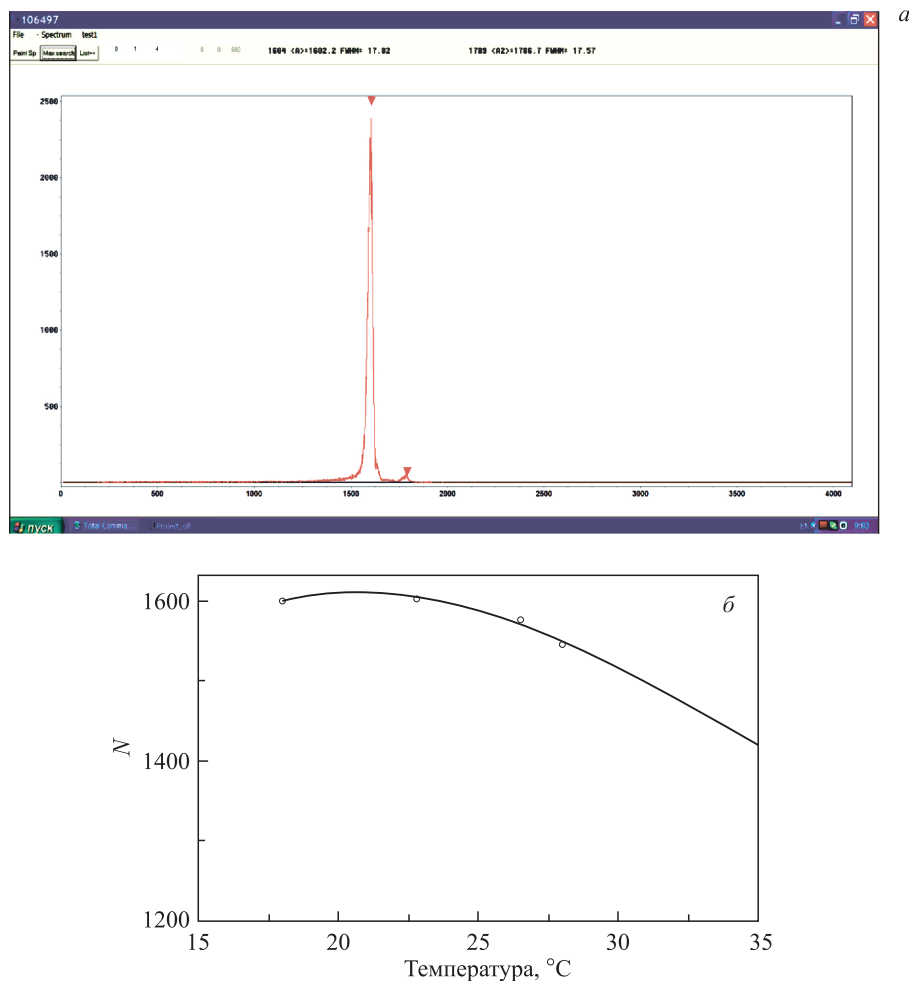


Рис. 5. а) Спектр (суммарный по заранее введенной калибровке для 48 стрипов) источника 5,5 МэВ. Стрелки показывают два наиболее интенсивных пика. В окнах на верхней панели их значения в каналах (1602,2 и 1786,7). б) Температурный тест модуля предварительного усиления для пика суммарного спектра

показан спектр источника 5,5 МэВ, причем программа автоматически находит два наиболее интенсивных пика (показаны стрелкой на графике).

На рис. 5, б показана в качестве примера выявленная на стадии испытаний при помощи данной программы температурная нестабильность одного из предусилительных блоков.

2.2. Отладка программы Writer.exe по отношению к поиску коротких корреляционных звеньев ER- α . Поле деятельности любого экспериментатора, и не только в данной области, предполагает интенсивные тесты электронно-спектрометрической аппаратуры перед ее использованием в долговременном эксперименте. Разумеется, самыми эффективными и зачастую строго необходимыми являются тесты на пучке тяжелых

ионов в реакциях с большими сечениями выхода продуктов полного слияния по отношению к основным, исследуемым реакциям. Однако всегда, когда возможны эффективные «беспучковые» тесты, это значительно продвигает процесс отладки наиболее деликатной части программы набора спектрометрических данных. В нашем случае таковым является набор данных с источника α -распада 5,5 МэВ, но при этом программа набора генерирует сигнал «ТОФ» посредством генератора случайных чисел, так чтобы примерно сохранялась пропорция по отношению к количеству сигналов имита-

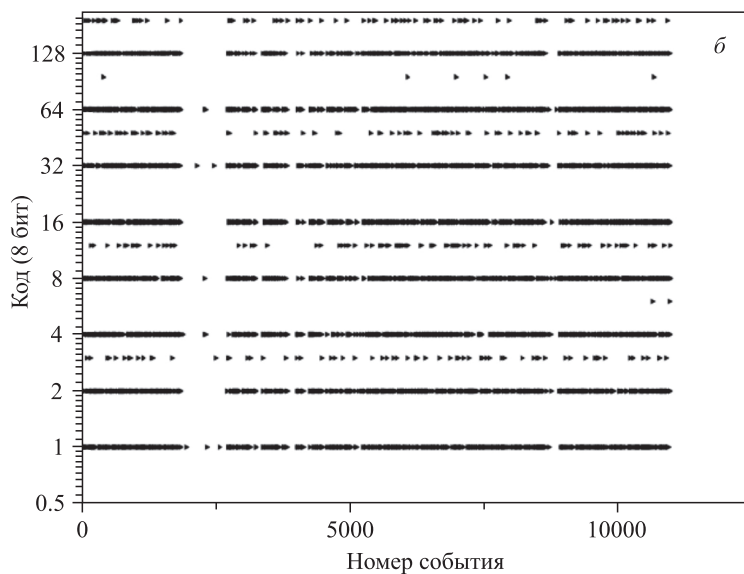
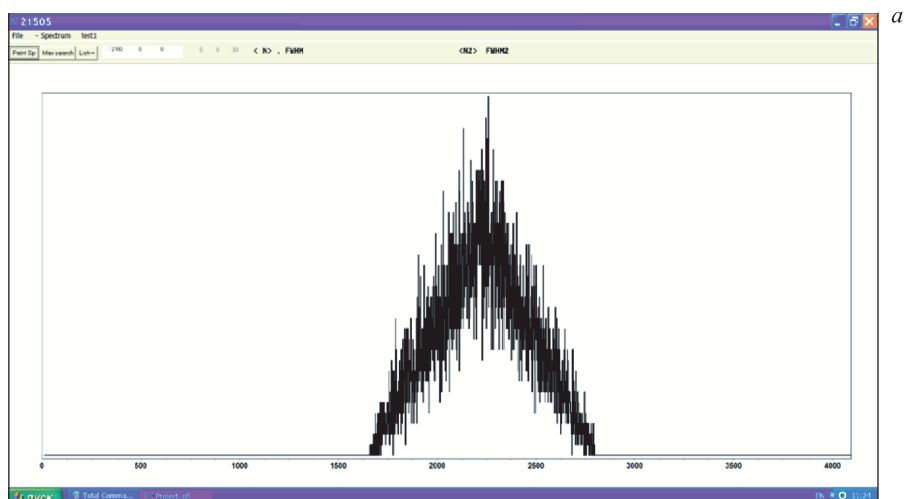


Рис. 6. а) Генерированный программой спектр «времени пролета» (каналы). б) Демонстрация наличия краевых эффектов для задних стрипов детектора (пунктирные линии, отличные от «чистых» кодов степеней числа 2)

торов ядер отдачи и α -распадов (рис. 6, *a*, см. табл. 1, рис. 6, *б* — демонстрация краевых эффектов).

Разумеется, пороги идентификации сигналов «ядро» и « α -частица» опускаются до уровня меньше 5 МэВ. И, соответственно, приписывание времяпролетной амплитуды событию происходит примерно следующим образом: $intntt=0$; $ntt = \text{random}(100)$; $\text{if}(ntt>30)$ $tof = (\text{TOF_MIN} + \text{TOF_MAX})/2 - \text{random}(600) + \text{random}(550)$; $\text{else } tof=0$; $\text{if}(ER==\text{true})$. Запись в матрицу ядер отдачи (); $\text{if}(ALFA==\text{true})$. Поиск корреляции (). В случае нахождения пар — «кандидатов» на корреляцию — происходит имитация останова пучка и запись в протокол параметров пары. При совпадении свойств кандидатов из протокола с результатами тщательного off-line анализа файла событий процесс отладки считается завершенным.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработано программное обеспечение для системы детектирования-мониторинга-защиты установки дубненский газонаполненный сепаратор ядер отдачи. В экспериментах по синтезу СТЭ оно было успешно и безальтернативно применено. Данная система показала высокую надежность в долговременных экспериментах. Разработанные алгоритмы поиска указателей на потенциальную корреляцию ядро отдачи – α -распад позволяют производить радикальное подавление фона в реакциях полного слияния. В случае применения детектирующих систем на основе DSSSD-детекторов выполнен учет роли краевых эффектов при поиске коррелированных звеньев. Данная работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (грант № 13-02-12052).

Автор благодарен коллегам А. М. Сухову и А. А. Воинову за помощь в работе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Oganessian Yu. Ts. et al.* Measurements of Cross Sections and Decay Properties of the Isotopes of Element 112, 114 and 116 Produced in the Fusion Reactions $^{233,238}\text{U}$, ^{242}Pu , and $^{248}\text{Cm} + ^{48}\text{Ca}$ // *Phys. Rev. C*. 2004. V. 70. P. 064609.
2. *Oganessian Yu. Ts. et al.* Measurements of Cross Sections for the Fusion-Evaporation Reactions $^{244}\text{Pu}(^{48}\text{Ca}, xn)^{292-x}114$ and $^{245}\text{Cm}(^{48}\text{Ca}, xn)^{293-x}116$ // *Ibid.* V. 69. P. 054607.
3. *Witwer D. et al.* Gas Phase Chemical Studies of Superheavy Elements Using the Dubna Gas-Filled Recoil Separator-Stopping Range Determination // *Nucl. Instr. Meth. B*. 2010. V. 268. P. 28–35.
4. *Rudolph D. et al.* Spectroscopy of Element 115 Decay Chains // *Phys. Rev. Lett.* 2013. V. 111. P. 112502.
5. *Tsyganov Yu. S., Polyakov A. N., Sukhov A. M.* An Improved Real-time PC-based Algorithm for Extraction of Recoil-Alpha Sequences in Heavy-Ion Induced Nuclear Reactions // *Nucl. Instr. Meth. A*. 2003. V. 513. P. 413–416.
6. *Zager V. B., Krylov A. I.* Visualization, Monitoring and Processing of Large Sets from Accelerator Control Systems // *Proc. of XXIV Intern. Symp. NEC'2013*. Varna, Bulgaria, Sept. 9–16. Dubna, 2013. P. 283–284.
7. *Oganessian Yu. Ts. et al.* Experimental Studies of the $^{249}\text{Bk} + ^{48}\text{Ca}$ Reaction Including Decay Properties and Excitation Function for Isotopes of Element 117, and Discovery of the New Isotope ^{277}Mt // *Phys. Rev. C*. 2013. V. 87. P. 054621.

8. *Цыганов Ю. С.* Газонаполненный сепаратор ядер отдачи: программные продукты, алгоритмы // ЭЧАЯ. 2011. Т. 42, вып. 5. С. 1535–1590.
9. *Tsyganov Yu. S., Polyakov A. N., Sukhov A. M.* Method of Active Correlations: Present Status // Proc. of the 3rd Intern. Conf. NPAE'2010, Kyiv, 2010. P. 379–381.
10. *Subbotin V. G. et al.* The Detection System of the Dubna Gas-Filled Recoil Separator // Acta Phys. Polon. B. 2003. V. 34, No. 4. P. 2159–2162.
11. *Sukhov A. M., Polyakov A. N., Tsyganov Yu. S.* Parameter Monitoring and Control System of the Dubna Gas-Filled Recoil Separator // Phys. Part. Nucl. Lett. 2010. V. 7, No. 5. P. 370–377.
12. *Tsyganov Yu. S. et al.* New Detection System for Heavy Element Research: Sum of Technologies // Proc. of XXIV Intern. Symp. NEC'2013. Varna, Bulgaria, 2013. P. 255.
13. *Walsh S.* Micron Semiconductors, UK. Private Communication.
14. *Кузнецов А. Н.* АЦП ПА-25К. ТехИнвест. Техн. описание. Свободн. эконом. зона «Дубна».

Получено 17 апреля 2014 г.