

**BELORUSSIAN STATE UNIVERSITY
INSTITUTE FOR NUCLEAR PROBLEMS**

**BASIC AND APPLIED
PHYSICAL RESEARCH
1986–2001**

Collected Articles

Editor: Professor V. G. Baryshevsky

**MINSK
2001**

**БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ**

**ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ
И ПРИКЛАДНЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ
ИССЛЕДОВАНИЯ
1986–2001 гг.**

Сборник трудов

Под редакцией профессора В. Г. Барышевского

**МИНСК
2001**

УДК 53(082)
ББК 22.3я43
Ф94

Редакционная коллегия:
доктор физико-математических наук,
профессор *В. Г. Барышевский* (ответственный редактор);
кандидат физико-математических наук
С. Н. Сытова (ответственный секретарь);
доктор физико-математических наук *С. А. Максименко*;
доктор физико-математических наук *В. В. Тихомиров*;
кандидат физико-математических наук *М. В. Коржик*;
кандидат физико-математических наук *А. С. Лобко*

Утверждено на заседании
Ученого совета НИИ ЯП БГУ
17 октября 2001 г., протокол № 86

Фундаментальные и прикладные физические исследования. 1986–2001 гг.:
Ф94 Сб. тр. / Редкол.: В. Г. Барышевский, С. Н. Сытова, С. А. Максименко и др.;
Под ред. В. Г. Барышевского. – Мн.: БГУ, 2001. – 457 с.
ISBN 985-445-545-9.

В сборнике представлены результаты научных исследований, выполненных сотрудниками НИИ ЯП БГУ за 15 лет его существования, в области ядерной и теоретической физики, прикладной физики и приборостроения.

УДК 53(082)
ББК 22.3я43

ISBN 985-445-545-9

© НИИ ЯП БГУ, 2001

МНОГОКАНАЛЬНАЯ ИНТЕГРАЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА ДЛЯ ГАЗОВЫХ ПРОВОЛОЧНЫХ ДЕТЕКТОРОВ

Г. Д. Алексеев^{*}, М. А. Батурицкий^{**}, О. В. Дворников^{***},
В. А. Михайлов^{**}, В. В. Токменин^{*}, А. И. Хохлов^{**}, А. А. Шишкин^{*}

^{*}Объединенный институт ядерных исследований, г. Дубна Московской обл.

^{**}НИИ ядерных проблем Белгосуниверситета, г. Минск

^{***}ОАО МНИПИ, г. Минск

Обязательным элементом современных физических установок в области физики высоких энергий являются детекторы мюонов, располагающиеся во внешних слоях этих установок в силу высокой проникающей способности таких частиц. Для регистрации мюонов используются многопроволочные газонаполненные детекторы (пропорциональные камеры с анодным и (или) катодным съемом и различные виды дрейфовых трубок). Периферийное расположение мюонной системы обуславливает большие геометрические размеры детектора. Вместе с требованием высокого пространственного разрешения это приводит к большому количеству каналов – десятки и сотни тысяч в текущих и планируемых экспериментах. Обеспечить съем сигналов в данном случае можно только с помощью заказных интегральных микросхем, успешный опыт разработки которых описывается в данной работе.

В 1996–1997 гг. в НИИ ЯП БГУ были разработаны две заказные аналоговые сверхбольшие интегральные микросхемы (СБИС) восьмиканального токового усилителя-формирователя Ampl-8.3 и восьмиканального компаратора Disc-8.3. Они предназначались целевым образом для передней мюонной системы эксперимента D0 на коллайдере «Тэватрон» в Национальной ускорительной лаборатории им. Ферми (г. Батавия, США) [1–4], однако в итоге оказались способными закрыть большую часть потребностей многопроволочных газовых детекторов, применяемых не только в физике высоких, но также средних и низких энергий. Семейство упомянутых выше микросхем получило общее название **DOM** по первым буквам словосочетания (**D**ubna+**D0**+**M**insk), отражающего имевшее место международное сотрудничество. Для достижения требуемых экспериментом D0 параметров, которые уточнялись в течение всего процесса разработки, понадобилось сделать три итерации разработки.

Электроника считывания размещается непосредственно на детекторе на восьмислойной печатной плате ADB (Aplifier Discriminator Board), разработанной в НИИ ЯП. Она содержит 32 канала усиления входных сигналов с последующим дискриминированием с постоянным порогом. Эти каналы реализованы на четырех корпусах Ampl-8.3 и четырех Disc-8.3.

Полуторагодовой опыт эксплуатации данной электроники в Фермилабе показал ее высокую надежность, устойчивость к самовозбуждению, перегрузкам

по входу и высоковольтному пробую. Используемая биполярно-полевая технология [5–8] по своему характеру является радиационно стойкой к облучению нейтронами [3, 9], что является дополнительным преимуществом данной электроники.

Кроме Фермилаба, данная электроника устанавливается сейчас в 10 тыс. каналов мюонной системы эксперимента COMPASS (ЦЕРН, г. Женева, Швейцария).

1. Особенности работы канала усиления и дискриминации сигналов MDT

Ключевой проблемой разработки электроники считывания мюонных детекторов являются заказные СБИС усилителей и дискриминаторов. Требования, предъявляемые передней мюонной системой эксперимента D0, менялись и уточнялись в течение всего процесса проектирования, отражая процесс углубления понимания работы детектора – мини-дрейфовых трубок (MDT) и возможностей проектируемых микросхем, поэтому понадобилось три итерации, чтобы получить изделия, оптимизированные под данную задачу.

MDT [10] разрабатывались и изготавливались в Объединенном институте ядерных проблем (ОИЯИ). Они представляют собой блоки из восьми трубок квадратного сечения $9,4 \times 9,4$ мм, образованные алюминиевым Ш-образным профилем толщиной 0,6 мм, с крышкой из нержавеющей стали. Внутри ячеек по центру натянута проволочка из золоченого вольфрама толщиной 50 мкм. Вся конструкция помещена в пенал из ПХВ, так как катод находится под высоким отрицательным потенциалом. Трубки заполнены газовой смесью $CF_4 + CH_4 = 90\% + 10\%$, обеспечивающей высокую скорость дрейфа электронов. Трубки работают в пропорциональном режиме и обеспечивают высокую скорость счета, малое время собирания заряда, позволяющее работать со 132-наносекундными циклами «Тэватрона», а также характеризуются малой скоростью старения.

Требования к усилителю определяются как свойствами MDT, так и всей системой («Тэватрон» – установка D0) в целом. Усилитель должен обладать высоким быстродействием, достаточным для обработки сигналов MDT с загрузкой до 10^3 импульсов в секунду на канал, определяемой светимостью модернизированного «Тэватрона». Сигнал MDT имеет примерно треугольную форму с переменной длительностью переднего и заднего фронтов, определяемой удалением траектории частицы от анодной проволочки MDT. Передний фронт, определяемый сбором электронов лавин, образуемых вблизи анода, более короткий (примерно 10–40 нс), задний, формируемый существенно менее подвижными положительными ионами, более затянут. Его типовые значения 20–150 нс. При этом интегрирование, выполняемое RC-цепями встроенной противозумовой фильтрации, не должно превышать минимальную длительность заднего фронта входного сигнала. Все это позволяет избежать применения цепей подавления полюса нулем [11].

В случае дискриминаторов для достижения требуемой точности временной привязки 4 нс переменная длительность фронтов сигнала не позволяет использовать приемлемые для многоканальных систем схемы со следящим порогом

(constant fraction и zero crossing) [12], поскольку они требуют постоянства фронтов сигнала. Из-за сложности внутренней структуры (в одном канале используются три компаратора) пришлось отказаться от очень интересной схемы двух-порогового дискриминатора [13]. Поэтому была выбрана схема дискриминатора с постоянным порогом ($0,5 \div 5,0$ мкА), нагруженного на низкошумящий усилитель с большим коэффициентом преобразования. Входное сопротивление усилителя R_{in} должно быть согласовано с волновым сопротивлением MDT, составляющим 320 Ом. При этом согласующий резистор, включенный последовательно со входом, вместе с R_{in} образует резистивный делитель, снижающий напряжение высоковольтных выбросов примерно в шесть раз в нашем случае, когда $R_{in} = 50$ Ом, обеспечивая дополнительную защиту от высоковольтных выбросов. Анализ поведения MDT при высоковольтном пробое газового промежутка показывает, что вход усилителя должен быть защищен от импульсов как отрицательной, так и положительной полярности.

Схема усилителя должна также обеспечивать быстрый выход из насыщения после значительных перегрузок по входу, возникающих при регистрации ливней или появлении стримерных импульсов. При этом уровень перекрестных помех должен быть достаточно низким, чтобы предотвращать ложные срабатывания дискриминаторов в соседних каналах.

Точность временной привязки и дрожание момента срабатывания дискриминаторов в каналах передней мюонной системы D0 не должны превышать 4 нс, а допустимый разброс порогов срабатывания – $\pm 10\%$ по плате и $\pm 10\%$ между средними значениями порогов по платам. Такие точностные параметры позволяют минимизировать значение высокого напряжения на анодах при достаточно широком плато счетной характеристики трубки.

Выходные каскады дискриминатора должны обеспечивать транспортировку выходных сигналов по ленточному кабелю на удаление до 30 м для последующей обработки в крейтах VME.

Перечисленные выше требования легли в основу выбора структуры и схемотехники разрабатываемой электроники.

2. Структура электроники

На момент начала данной работы имелось несколько типов серийно выпускаемых микросхем усилителя-дискриминатора в КМОП и биполярной технологиях. Они предназначались для работы с кремниевыми полупроводниковыми, сцинтилляционными и газонаполненными детекторами. Наиболее близким аналогом являлась схема ASD-8 [13] и ее последующая модификация ASD/BLR (Amplifier-Shaper-Discriminator with Baseline Restoration) [14]. Однако, несмотря на очевидные ее достоинства, ее нельзя было использовать из-за слишком большого входного сопротивления (120 Ом) и недостаточного усиления. Поэтому было принято решение о разработке двух новых микросхем – усилителя и компаратора, причем в отдельных корпусах для минимизации триггерных шумов и межканальных помех и увеличения выхода годных.

Количество каналов в каждой микросхеме было принято равным количеству каналов в одной MDT, т. е. восьми. При этом на печатной плате, монтируемой

непосредственно на детекторе, размещается 32 канала усиления/дискриминации, обеспечивая возможность кратчайшим путем снимать сигналы с одного октанта (1/8 слоя детектора) максимальной толщины, т. е. четырех восьмиканальных MDT.

3. СБИС восьмиканального токового усилителя-формирователя Ampl-8.3

3.1. Требования к усилителю. Проектирование усилителя проводилось с учетом следующих требований:

- 1) максимально большой коэффициент преобразования;
- 2) возможность работы с входными импульсами обеих полярностей для расширения области применения;
- 3) диодная защита от высоковольтных импульсов обеих полярностей на входе;
- 4) каскады усиления должны строиться по дифференциальной схеме для минимизации перекрестных помех;
- 5) тип усилителя – токовый, без общей отрицательной обратной связи;
- 6) максимальная симметрия топологии СБИС усилителя для минимизации разбалансировки дифференциального выхода усилителя по постоянному току на холостом ходу;
- 7) использование дополнительного опорного каскада, полностью идентичного входному, для минимизации синфазных помех и задания рабочей точки второго каскада усиления;
- 8) достижение компромисса между быстродействием, уровнем шумов и потребляемой мощностью в многоканальной реализации СБИС.

Следует отметить, что во время всего процесса проектирования MDT рассматривалась как система с распределенными параметрами, поскольку время распространения сигнала в трубках максимальной длины достигает 20 нс, что сравнимо и даже превосходит длительность его переднего фронта.

3.2. Схема усилителя. Схема одного канала окончательного третьего варианта усилителя Ampl-8.3 представлена на рис. 1. Усилитель состоит из входного каскада «общая база – общий коллектор» (Q1, R28, Q2÷Q5, R7) с диодами защиты от положительных и отрицательных выбросов (Q31÷Q33) и резистором входа тестирования R39; двух дифференциальных каскадов усиления напряжения (Q6, Q7, R35, R36, R4, R5, C1A, C1B, Q8, R8) и (Q20, Q21, R37, R38, R23, R24, C4FA, C4FB, Q22, R25), разделенных эмиттерными повторителями со сдвигающими диодными цепочками Q23÷Q26, R26 и Q27÷Q30, R27; выходных эмиттерных повторителей Q13, Q9, R9 и Q14, Q10, R10 и опорного каскада Q15, R15, Q16÷Q19, R17 для стабилизации рабочей точки усилителя на холостом ходу и создания одинаковых условий для подавления синфазной помехи на первом дифференциальном каскаде, а также для снижения межканальных помех [4]. Поэтому опорный каскад сделан полностью идентичным входному, включая резистор тестового входа R40 и диодную защиту от положительных и отрицательных выбросов Q34÷Q36, обеспечивая абсолютную идентичность входных условий, в том числе и токов утечки. Схема Q11, Q12, R11, R12 определяет токи в многокаскадном токовом зеркале, задавая рабочий режим всем каскадам усиления. Каскад с

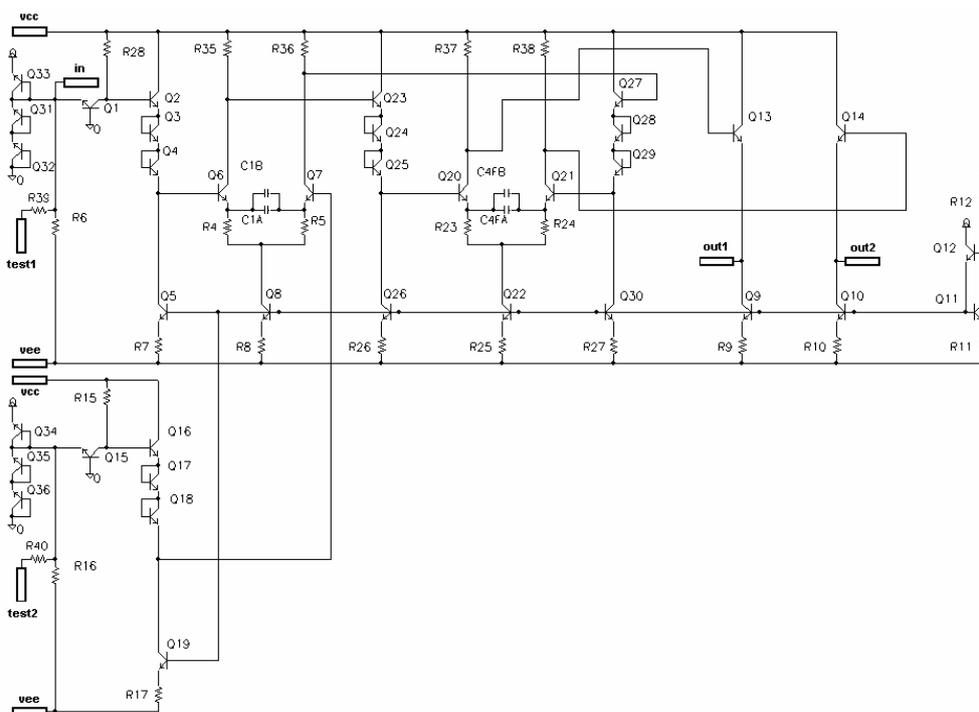


Рис. 1. Схема электрическая принципиальная одного канала СБИС DOM Ampl-8.3

общей базой преобразует входной ток в напряжение на резисторе R28. Головной транзистор Q1 представляет собой СВЧ npn-транзистор с $R_{bb} \leq 30$ Ом, $f_T > 3$ ГГц. Он работает при коллекторном токе 0,8 мА, конфигурация с общей базой обеспечивает входное сопротивление примерно 50 Ом в широкой полосе частот.

Для получения необходимого усиления в схеме используется два дифференциальных каскада. Эмиттерные повторители с диодными смещающими цепочками Q2÷Q4 и Q16÷Q18 согласуют каскады по постоянному напряжению, выходные эмиттерные повторители Q13, Q9, R9 и Q14, Q10, R10 обеспечивают требуемую нагрузочную способность.

Для увеличения отношения сигнал/шум были предприняты следующие меры: 1) оптимизированы входные токи транзисторов с учетом как эквивалентной схемы детектора, так и собственных параметров головного транзистора; 2) вставлены фильтрующие цепи RC-CR с постоянной времени $RC \approx CR \approx 20$ нс, сформированные транзисторами Q6, Q7 и Q20, Q21, резисторами R4, R5, R35, R36 и R23, R24, R37, R38, конденсаторами C1A, C1B и C4FA, C4FB. Интегрирование выполняется RC-цепями, образованными резисторами нагрузки и паразитными емкостями «коллектор – база», C_{CB} , и «коллектор – подложка», C_{CS} , транзисторов, входными емкостями эмиттерных повторителей, C_{IN} , транзисторами Q23, Q27, а также паразитными емкостями резисторов.

Дифференцирование выполняется эмиттерными резисторами и конденсаторами. Вследствие зависимости параметров RC-CR цепей и паразитных емкостей от положения рабочей точки окончательные номиналы резисторов и конденса-

торов выбирались по результатам моделирования в Pspice, где использовались модели резисторов и конденсаторов, учитывающие паразитные элементы и зависимость номиналов от рабочей точки.

Следует отметить, что описание фильтрующих свойств схемы формирователем RC-CR является в известной степени идеализацией, так как эмиттерные конденсаторы выполняют не дифференцирование в чистом виде (усилитель остается усилителем постоянного тока), а обычную высокочастотную коррекцию, увеличивающую коэффициент преобразования на высоких частотах и расширяющую таким образом полосу частот. Роль дифференцирующего конденсатора выполняет также разделительный конденсатор 1 нФ, соединяющий выход усилителя со входом компаратора.

3.3. Топология Ampl-8.3. Как уже говорилось, общая отрицательная обратная связь с выхода на вход не вводилась, поэтому для уменьшения разбалансировки выходных напряжений на прямом и инверсном выходах в режиме покоя предпринимались специальные меры по обеспечению полной идентичности элементов в обоих плечах дифференциальных каскадов, а также во входном и опорном каскадах «общая база – общий коллектор». При проектировании топологии схемы первостепенное внимание уделялось проблеме симметрии: входные транзисторы большой площади Q1 и Q15 располагались в непосредственной близости друг от друга, чтобы минимизировать разность их базэмиттерных напряжений ΔU_{BE} и улучшить температурное согласование в широком диапазоне.

Таким же образом располагались резисторы R28, R15 и R6, R16, поскольку разброс их номиналов также влияет на величину разбалансировки выходного напряжения.

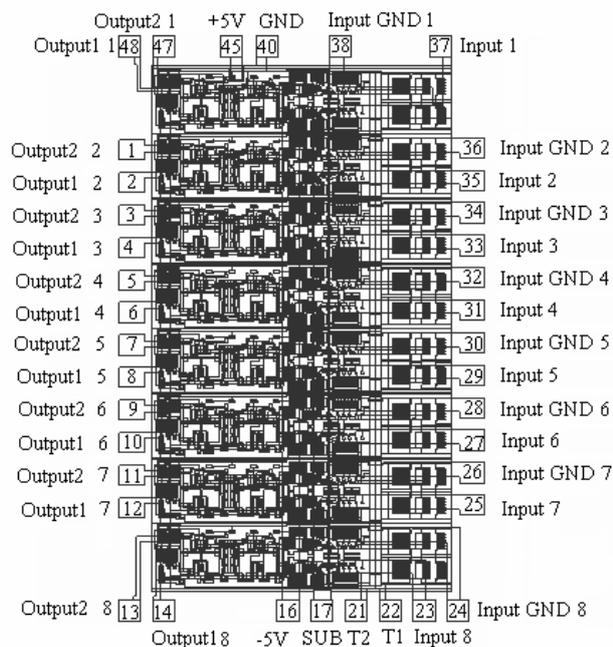


Рис. 2. Топология Ampl-8.3

Топология одного канала усилителя Ampl-8.3 (рис. 2) имеет следующие особенности:

- ширина канала 320 мкм. Она определяется размерами двух контактных площадок и минимальным зазором между ними (100 мкм + 100 мкм + 60 мкм + 60 мкм = 320 мкм). Размер кристалла восьмиканального усилителя с контактными площадками 2,3 × 3,3 мм;
- каждый канал экранирован контактом к подложке, выведенной металлическим проводником к отдельной контактной площадке (SUB), не имеющей гальванической связи с шиной напряжения питания;
- каждый канал имеет диодную защиту от положительных и отрицательных выбросов напряжения, диоды которой вносят паразитную емкость 4,26 пФ;
- каждый вход имеет отдельную шину земли InputGND, начинающуюся от базы головного транзистора. Эти точки подключаются в каждом канале к точкам земли Q12 и R12, которые, в свою очередь, подключаются к контактной площадке;
- имеется отдельная контактная площадка для вывода подложки, не связанная с отрицательным источником питания. Подавая на нее достаточно большой отрицательный потенциал, ограниченный практически напряжением пробоя подложки, можно существенно уменьшить паразитные емкостные связи между элементами ИМС и подложкой, что приводит к существенному уменьшению межэлементных и межканальных помех.

Для обеспечения строгой симметрии входного и опорного каскадов в опорный были введены функционально избыточные защитные диоды и тестовый резистор 100 кОм. Все это обеспечило удовлетворительную работу усилителя без использования внешних балансирующих элементов.

Принятые меры позволили существенно снизить перекрестные помехи, вместо дорогостоящих экранированных металлокерамических корпусов с посадкой на золотой эвтектический слой был применен более дешевый метод с использованием пластмассового корпуса с посадкой кристаллов на токопроводящий клей, что значительно уменьшило стоимость изделия в серийном производстве.

3.4. Характеристики СБИС DOM Ampl-8.3. Измеренные параметры усилителя третьей итерации Ampl-8.3 приведены в следующей таблице.

Таблица 1

Характеристики Ampl-8.3

Параметр	Значение ¹
Коэффициент преобразования, К, мВ/мкА	≥130 (65 на плечо)
Количество каналов в одном корпусе	8
Полярность входного сигнала	±
Дифференциальный выход	Да
Выходная нагрузка, Ом, не менее	1000
I_{noise} при емкости детектора: $C_D = 0$, г.м.с. нА	35
$C_D = 60$ пФ, г.м.с. нА	60
Длительность переднего и заднего фронтов по уровням (0,1 ÷ 0,9), нс	7
Напряжение смещения между выходами, В	≤1,5
Задержка распространения сигнала, нс	6

Характеристики Ampl-8.3

Параметр	Значение ¹
Динамический диапазон ² , дБ	52
Входное сопротивление, Ом	≈ 50
Ток пробоя при частоте импульсов 10 Гц и длительности 1 мкс, А: – положительная полярность – отрицательная полярность	3 10
Межканальные помехи, дБ: – при фронтах 1,8 нс – при фронтах 15 и 20 нс (имитация сигнала MDT)	– 47 – 54
Напряжение питания, В	±3...±5
Рассеиваемая мощность при питании ±3...5 В, мВт	160...640
Корпус	Пластмассовый 48-выводной 4222.48-2 ГОСТ 17476-88

¹ Все величины, за исключением рассеиваемой мощности, измерялись при напряжениях ±5 В.

² Для входных сигналов обеих полярностей

Выходные сигналы усилителя Ampl-8.3, нагруженного на нагрузку 1 кОм через разделительный конденсатор 1000 пФ, показаны на рис. 3. На верхней осциллограмме представлен сигнал от генератора, формирующий входной ток аналогичной формы с помощью резистора с номиналом, намного превышающим входное сопротивление схемы. На положительном и отрицательном выходах (вторая и третья осциллограммы) наблюдаются выбросы величиной примерно 10 %.

Следует особо подчеркнуть, что выбранная схемотехника и топология Ampl-8.3 предотвращают самовозбуждение не только на печатной плате, но и при тестировании в корпусах и даже на пластинах. Не было зарегистрировано ни одного случая самовозбуждения ни в одном из 50 тыс. каналов при их сборке и тестировании.

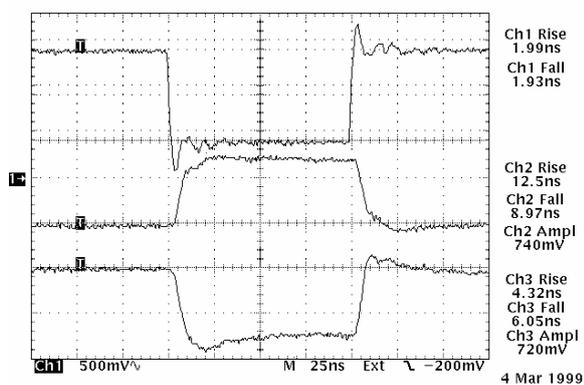


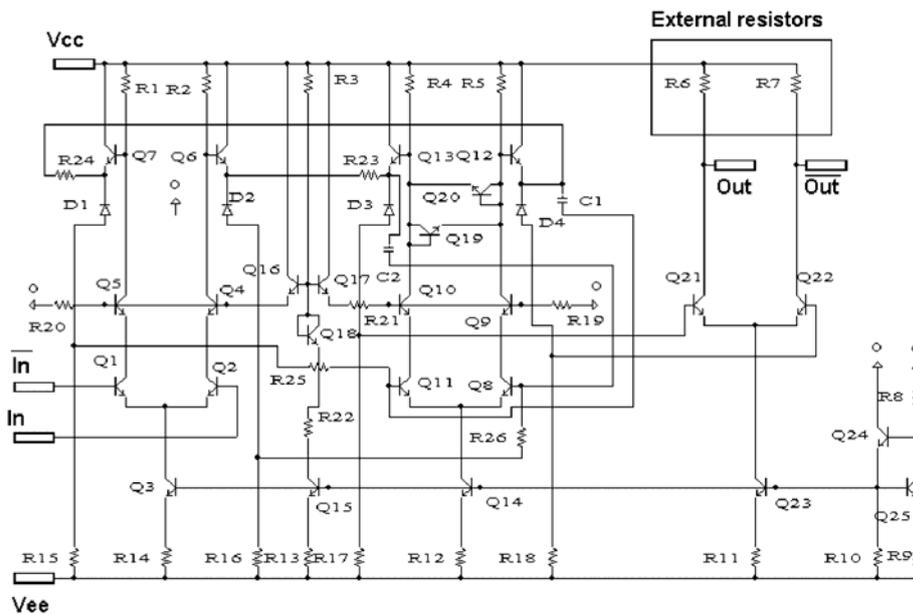
Рис. 3. Пример выходных сигналов Ampl-8.3

4. СБИС восьмиканального компаратора Disc-8.3

4.1. Основные проблемы разработки Disc-8.3. Основной проблемой разработки компаратора было достижение максимального быстродействия при умеренной потребляемой мощности, что весьма существенно для многоканальной схемы. Эта проблема была решена за счет использования биполярных СВЧ-транзисторов в режиме малых токов.

ИМС компаратора [2] содержит восемь параллельных каналов, имеющих общие шины питания. Следует отметить, что на момент начала разработки восьмиканальные микросхемы компараторов нигде серийно не выпускались. Для расширения функциональных возможностей компаратора было принято решение не встраивать внутрь ИМС цепей задания порогового напряжения. Реализация выходных каскадов по схеме с открытым коллектором позволяет получать различные уровни выходных сигналов в диапазоне от 0 до 5 В, обеспечивая согласование по уровням с ТТЛ.

Схема электрическая принципиальная (СхЭП) одного канала показана на рис. 4. Компаратор содержит три дифференциальных каскада, первый и второй из них (с резистивной нагрузкой) обеспечивают требуемое усиление по напряжению. Третий каскад (с открытым коллекторным выходом) предназначен для работы на внешнюю нагрузку. Компаратор имеет дифференциальный вход и комплементарный токовый выход. Первый дифференциальный каскад Q1, Q2 нагружен каскадами с общей базой Q4, Q5 для уменьшения эффекта Миллера.



Р и с. 4. Схема одного канала компаратора Disc-8.3

Второй дифференциальный каскад имеет аналогичную структуру. Противоположно включенные диоды Q19, Q20 фиксируют максимальную величину напряжения между коллекторами Q9, Q10, обеспечивая увеличение быстродействия. Эмиттерные повторители Q6, Q7, Q12 и Q13 со стабилитронами D1÷D4 согласуют дифференциальные каскады по постоянному напряжению. Второй дифференциальный каскад охвачен частотнонезависимой обратной связью, осуществляемой резисторами $R23 = R24 = 1,2 \text{ k}\Omega$, $R25 = R26 = 7 \text{ k}\Omega$ и конденсаторами $C1 = C2 = 2,1 \text{ пФ}$, которые формируют на выходе компаратора импульсы длительностью 40 нс.

4.2. Топология Disc-8.3. Топология СБИС компаратора Disc-8.3 приведена на рис. 5. Размеры канала дискриминатора без контактных площадок $320 \times 770 \text{ мкм}$, площадь кристалла 8-канального дискриминатора с контактными площадками составляет $1,1 \times 2,9 \text{ мм}$. Ширина канала определяется минимальным размером контактных площадок (100 мкм) и допустимыми зазорами между ними (60 мкм).

Топология компаратора имеет следующие особенности:

- каждый канал экранирован контактом к подложке, который подключен металлической шиной к отдельной контактной площадке (SUB), изолированной от шин питания;
- шина нулевого потенциала (GND) имеет две контактные площадки, подключенные параллельно;
- стабилитроны образованы обратносмещенными эмиттерными переходами pnp-транзисторов, коллекторы которых подключены к положительной шине питания; для уменьшения влияния паразитных коллекторных емкостей в коллекторы транзисторов Q9, Q10 введены встречно включенные диоды Q19, Q20, образованные за счет дополнительной p-области, сформированной в эпитаксиальном кармане pnp-транзистора.

Следует отметить, что каналы усилителя Ampl-8.3 и компаратора Disc-8.3 имеют одинаковую ширину, что допускает их объединение в одном кристалле усилителя-дискриминатора размером $3,3 \times 2,3 \text{ мм}$ (вместе с тестовыми элементами, метками и т. д.).

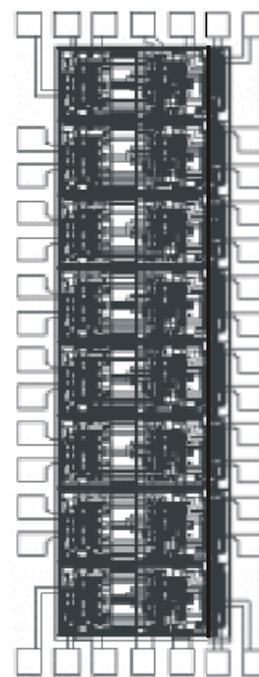


Рис. 5. Топология Disc-8.3

4.3. Характеристики компаратора. Измеренные параметры компаратора приведены в табл. 2. Он отличается хорошим быстродействием: при работе на согласованную нагрузку 110 Ω (скрученная пара) фронты для перепадов 1/0 и 0/1 составляют соответственно 1,8 и 2,2 нс. Каналы СБИС обладают высокой идентичностью: разность задержек срабатывания не превышает 4 нс при превышении порогового напряжения на 10 мВ, входные токи отличаются не более чем на 0,01 мкА. Выход компаратора способен работать на скрученную пару или плоский ленточный кабель длиной до 30 м.

Таблица 2

Параметры ИМС компаратора Disc-8.3

Параметр	Значение
Смещение по входу, мВ	≤ 5
Входной ток смещения, мкА	$\leq 0,1$
Входной ток, мкА	1,0
Неидентичность входных токов по каналам, мкА	0,01
Превышение над порогом, необходимое для надежного срабатывания, мВ	5
Минимальная длительность выходного сигнала, нс	40
Задержка переключения при превышении над порогом, нс: при 10 мВ при 60 мВ	36 14
Максимальная разность задержки переключения по каналам, нс: при превышении 10 мВ при превышении 60 мВ	≤ 4 < 1
Фронты выходного сигнала 01/10 при согласованной нагрузке 110 Ом, нс	2,2/1,8
Напряжение питания, В	± 5
Число каналов в корпусе	8
Потребляемая мощность, мВт/корпус	≤ 670
Корпус	пластмассовый 48-выводной четырехсторонний 4222.48-2 ГОСТ 17476-88

5. Плата усиления-дискриминации ADB

5.1. Печатная плата. Электроника считывания сигналов MDT располагалась на восьмислойной печатной плате ADB размером 172,6 \times 82,5 \times 1,6 мм с двухсторонним расположением элементов [15]. Для обеспечения возможности размещения ADB непосредственно на детекторе ширина платы задавалась равной ширине MDT.

На каждой плате размещалось по четыре корпуса Ampl-8.3 и Disc-8.3, образуя 32 канала съема сигналов. Последовательно со входом включены резисторы 27 Ом, составляющие часть сопротивления 270 Ом, необходимого для согласования 50-омного входного сопротивления усилителя с волновым сопротивлением MDT 320 Ом (вторая его часть – резисторы 240 Ом – располагается непосредственно внутри MDT).

Дифференциальные выходы усилителей подключаются к дифференциальным входам компараторов через разделительные конденсаторы емкостью 1 нФ. При данном номинале обеспечивается минимальный сдвиг базовой линии сигнала.

Открытые коллекторы выходов дискриминаторов нагружены на резисторы 1 кОм для возможности проверки работоспособности без подключения дополнительных нагрузок. Основной согласованной нагрузкой являются резисторы 120 Ом, включенные на противоположном конце 80-проводного плоского ленточного кабеля высокой плотности, передающего сигналы MDT на дальнейшую обработку.

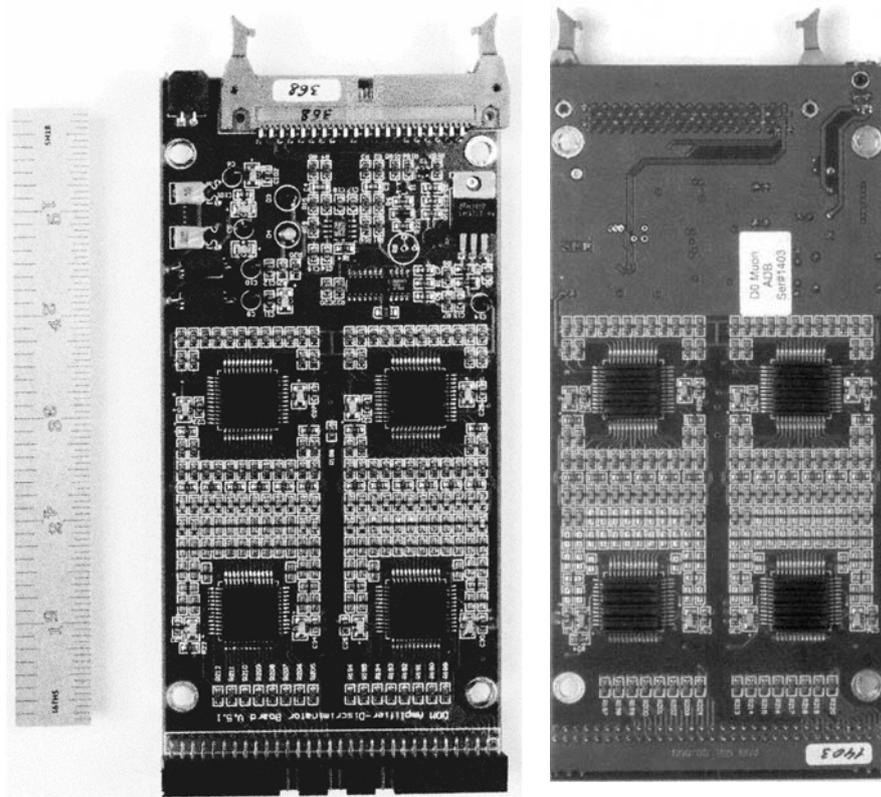
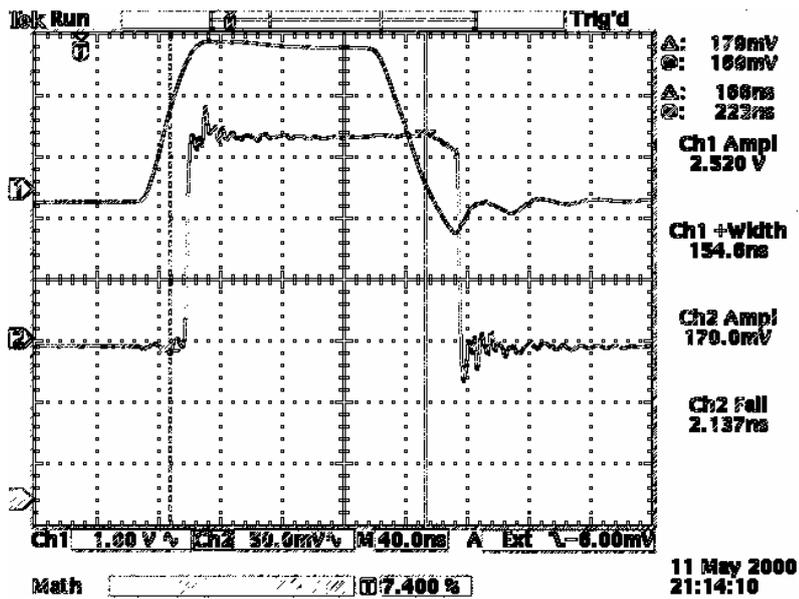


Рис. 6. Внешний вид платы ADB

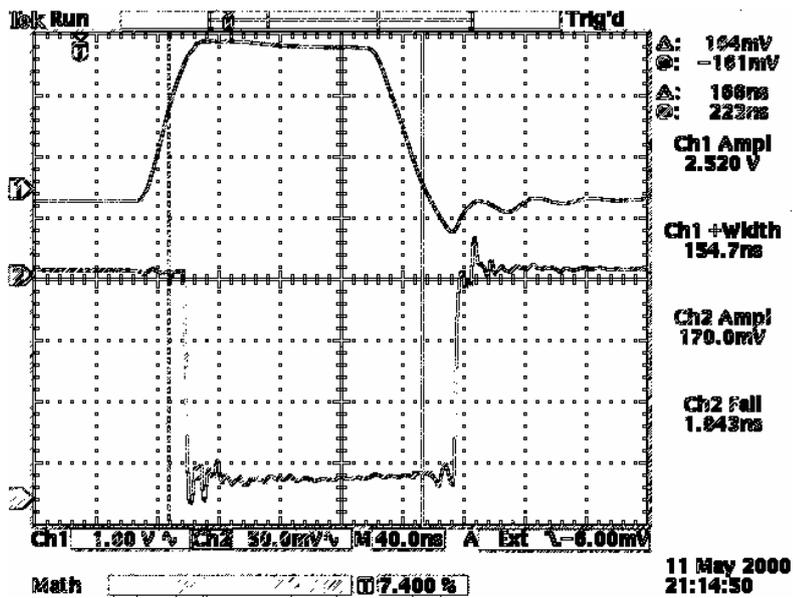
Плата имеет встроенные цепи тестирования каналов по тестовым входам $Amppl-8.3$ и цепи контроля питания. Верхняя и нижняя стороны платы ADB показаны на рис. 6.

5.2. Рабочие характеристики платы ADB. Рабочие характеристики платы измерялись на стенде, прототипах и рабочих октантах (1/8 часть слоя) детектора. В табл. 3 приведены суммарные характеристики каналов, не представленные в табл. 1 и 2. На рис. 7 показан сигнал на выходах усилителя и компаратора платы ADB при подаче на вход прямоугольного импульса.

Одним из ключевых параметров системы является однородность порогов срабатывания по каналам. Для обеспечения требуемой точности восстановления треков мюонов и минимизации высокого напряжения на анодных проволочках MDT производился отбор плат с разбросом порогов срабатывания в интервале $\pm 10\%$ по 32 каналам на одной плате и с таким же разбросом между средними значениями порогов для различных плат при среднем значении порога 1 мкА.



a



b

Рис. 7. Сигналы на выходе усилителя и положительном (а) и отрицательном (б) выходах дискриминатора одного канала платы ADB

Характеристики платы ADB

Параметр	Значение
Количество каналов	32
Динамический диапазон входных сигналов, дБ	60
Полярность входного сигнала	Отрицат.
Входное сопротивление, Ом	≈ 77
Неидентичность порогов срабатывания по плате, %	$< \pm 10$
Неидентичность средних значений порогов по платам, %	$< \pm 10$
Задержка срабатывания при входном токе 2,24 мкА ($I_{thr} = 1,12$ мкА), нс	33
Дрожание выходного сигнала, нс	0,8
Точность временной привязки в интервале $2I_{thr} \div 10I_{thr}$ при $I_{thr} = 1,12$ мкА, нс	3,6
Перекрестные помехи при пороге $I_{thr} = 0,2$ мкА, дБ	-57
Защита по входу от высоковольтных импульсов обеих полярностей: конденсатор 3,5 нФ, заряженный до напряжения $\pm 3,5$ кВ, разряжается на вход ADB через резистор 240 Ом с частотой 10 Гц в течение 10 мин	Выхода из строя не наблюдается

Результирующее распределение порогов срабатывания по 1576 платам (50 432 каналам) мюонной системы эксперимента D0 показано на рис. 8. Среднее значение порога составило 1,19 мкА при среднеквадратическом отклонении 6 %.

Следует отметить, что на испытательном стенде собственные шумы электроники позволяли опускаться по порогу до 0,1 мкА, а на рабочих октантах до 0,4 мкА, тогда как рабочий диапазон порогов в мюонной системе D0 задан $0,5 \div 2,0$ мкА. Расположение плат ADB на октанте показано на рис. 9.

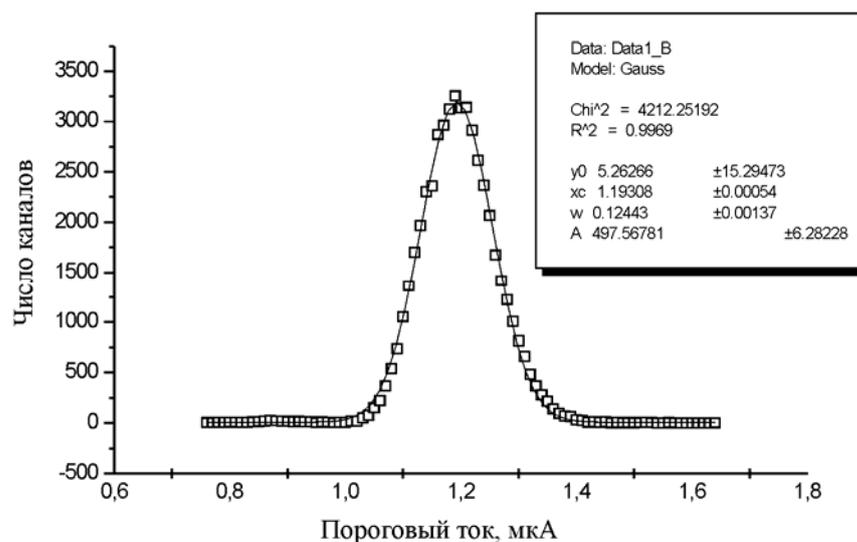


Рис. 8. Распределение порогового тока для 50 432 каналов (1576 плат ADB) передней мюонной системы D0



Рис. 9. Расположение плат ADB на октанте

Одним из достоинств ADB является сохранение работоспособности при больших перегрузках по входу. Даже при превышении верхней границы динамического диапазона почти в 30 раз, когда усилитель *Ampl-8.3* входит в глубокое насыщение, его выходного сигнала достаточно для переключения дискриминатора *Disc-8.3*, а уширение выходных импульсов не приводит к их наложению даже при нагрузках, на порядок превышающих допустимые в D0 [15].

Важно также, что перегрузки по входу практически не приводят к ложным срабатываниям в соседних каналах, для описания которых было введено понятие уровня перекрестных помех в сквозном канале ADB (аналоговый вход – цифровой выход), определяемого как $-20\lg(I_{in}/I_{thr})$, где I_{in} есть входной ток в активном канале, при котором происходит ложное срабатывание в соседнем канале, I_{thr} есть пороговое значение тока, одинаковое во всех каналах. В процессе испытаний ложные срабатывания наблюдались только при очень низком значении порога 0,2 мкА, при этом уровень так определенной перекрестной помехи составлял -57 дБ [15]. Следует указать, что этот параметр надо отличать от уровня перекрестных помех в аналоговых каналах усиления, определенного в [3] как $-20\lg(U_{out}/U_{int+})$, где U_{out} есть дифференциальный выходной сигнал в активном канале, а U_{int+} есть величина помехового импульса положительной полярности в соседнем канале, поскольку только такой импульс может переключить

дискриминатор. Величина перекрестных помех в усилителе составляет –47 дБ для сигналов с крутыми фронтами (1,7 и 1,8 нс), а для более близких к реальным (фронты 15 и 20 нс) –54 дБ, что показывает эффективность принятых мер по развязке каналов как на уровне кристалла, так и печатной платы.

Высокие электрические и эксплуатационные параметры описываемой электроники, отмеченные в ходе наладки и эксплуатации в Фермилабе, создали условия для ее применения в эксперименте COMPASS (ЦЕРН, г. Женева, Швейцария) в количестве 10 тыс. каналов.

Успех данной разработки во многом зависел от хорошо налаженного сотрудничества между физиками из ОИЯИ, разработчиками из НИИ ЯП Белгос-университета и промышленностью, в частности, НИКТП «Белмикросистемы» и заводом «Интес» ПО «Интеграл», а также специалистами из ОАО «МНИПИ». На стадии разработки НИКТП «Белмикросистемы» оперативно обрабатывало на пластинах изменения в схемах, вносимые после их испытаний с прототипами детекторов в Фермилабе. Массовый выпуск микросхем сопровождался выходным контролем изделий на пластинах и в корпусах, проводившимся по методикам, разработанным в НИИ ЯП. Завод «Интес» выполнял сборку в корпус, подвергая собранные изделия электротермотренировке и термоциклированию для обеспечения их долговременной эксплуатационной надежности. НИИ ЯП осуществлял входной контроль микросхем с учетом динамических параметров. Результат этого контроля – более 96 % годных для Ampl-8.3 и 99 % для Disc-8.3 – подтвердил правильность принятых конструкционных (размещение усилителей и компараторов в отдельных кристаллах, восьмиканальное исполнение) и схемотехнических решений, а также эффективность налаженного межотраслевого сотрудничества. Полугодовой опыт эксплуатации электроники в Фермилабе продемонстрировал высокое качество электрических параметров микросхем и их высокую надежность.

Таким образом, впервые в истории отечественной микроэлектроники белорусские микросхемы были внедрены в массовом масштабе за рубежом, показав возможности белорусской науки и промышленности в области современных высоких технологий.

Литература

1. *Khokhlov A. I. et al.* Muon System Electronics Upgrade. Technical Design Report. D0 Note #3299, Aug. 7 1997.
2. *Alexeev G. D. et al.* // Nucl. Instr. Meth. 1999. Vol. A423. P. 157–162.
3. *Alexeev G. D. et al.* // Nucl. Instr. Meth. 2001. Vol. A462. P. 494–505 .
4. *Алексеев Г. Д. и др.* // III Международная научно-практическая конференция «Вузовская наука, промышленность, международное сотрудничество»: Докл. Мн., 2000. С. 183–188.
5. *Baturitsky M. A., Dvornikov O. V.* // Nucl. Instr. Meth. 1996. Vol. A378. P. 564–569.
6. *Baturitsky M. A. et al.* // Nucl. Instr. Meth. 1996. Vol. A378. P. 570–576.
7. *Baturitsky M. A., Dvornikov O. V.* // Nucl. Instr. Meth. 1997. Vol. A399. P. 113–118.
8. *Baturitsky M. A., Dvornikov O. V.* // Nucl. Instr. Meth. 1997. Vol. A398. P. 308–314.
9. *Baturitsky M. A. et al.* // Nucl. Instr. Meth. 1995. Vol. A352. P. 604–609.
10. *Abramov V. et al.* // Nucl. Instr. Meth. 1998. Vol. A419. P. 660.

11. Григорьев В. А., Колюбин А. А., Логинов В. А. Электронные методы ядерно-физического эксперимента. М., 1988.
12. Whitaker S. The CSC System Performance. GEM TN-93-282. Jan.18–19. 1993. P. 119–161.
13. Newcomer F. M. et al. // IEEE Trans. on Nuclear Sci.1993. NS-40(4). P. 630.
14. Bevensee B. et al. // IEEE Trans. on Nuclear Sci.1996. NS-43(3). P. 1725.
15. Alexeev G. D. et al. The DØ Forward Angle Muon System front-end electronics design. // Nucl. Instr. Meth. (to be printed).

MULTICHANNEL MONOLITHIC ELECTRONICS FOR GASEOUS WIRE DETECTORS

**G. D. Alexeev, M. A. Baturitsky, O. V. Dvornikov, V. A. Mikhailov,
V. V. Tokmenin, A. I. Khokhlov, A. A. Shishkin**

The front-end electronics has been designed for Mini-Drift Tubes (MDTs) used for upgrading of the DØ Forward Angle Muon System (FAMUS) (Fermilab, Batavia, USA). It is based on two eight-channel ASICs of DØM family: the low-noise bipolar transresistance amplifier Ampl-8.3 and comparator Disc-8.3 designed on the basis of BJT-JFET technology. The amplifier has differential gain 130 mV/μA at 1 kΩ, input noise 35 nA r.m.s. and 60 nA r.m.s. at 0 pF and 60 pF input capacitance, respectively, leading/trailing edge 7 ns, input resistance ≈50 Ω, crosstalks -54 dB at real signals, dissipated power 160...640 mW/chip for ±3V...5V supply. The comparator ASIC output leading/trailing edges are 2.2 ns and 1.8 ns at matched 110 Ω load. Dissipated power equals 670 mW/chip. The output can drive 30 m flat ribbon cable or twisted pair line terminated by differential line driver. By four of these ASICs are located at 32-channel Amplifier/Discriminator Board. The ADB provides operation with adjustable threshold currents 0.5÷5.0 μA. Low intrinsic noise and small firing current dispersion provide ability of detector robust performance at low levels of anode high voltage (below 3.4 kV). The electronic channels save operability at large input overdrives. Above 50,000 channels have been produced and installed at the D0 and 10,000 at Muon System of COMPASS experiment (CERN, Geneva, Switzerland). Threshold distribution for 50,432 channels is presented. This electronics can be used with various gaseous wire detectors of physics experimental setups for high, middle and low energies.

ИССЛЕДОВАНИЯ В СВЧ-ДИАПАЗОНЕ: ЭЛЕКТРОДИНАМИКА РЕЗОНАНСНЫХ СИСТЕМ, ПРИБОРЫ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ РЕШЕНИЯ НАУЧНЫХ И ПРИКЛАДНЫХ ЗАДАЧ

В. Н. Родионова, В. А. Карпович, Г. Я. Слепян

В настоящее время интенсивно развивается СВЧ-техника в дециметровом и сантиметровом диапазонах длин волн и ускоренно осваиваются миллиметровый и субмиллиметровый диапазоны. Это связано с расширяющимися возможностями радиолокационной, радионавигационной, связной аппаратуры, систем наведения и управления, которые могут быть реализованы только в этих диапазонах (разрешающая способность обнаружения и поражения цели, помехозащищенность, быстродействие) [1–3].

В области микроволновой техники нами проектируются приборы и компоненты с требуемыми параметрами. Разработаны такие микроволновые компоненты, как резонаторы, детекторы, смесители, генераторы, аттенуаторы, направленные ответвители и другие не только в сантиметровом и миллиметровом (1–180 ГГц), но и в субмиллиметровом диапазонах длин волн (180–405 ГГц). Основными преимуществами этих компонентов являются: широкополосность, низкие вносимые потери, низкий уровень шумов. Разрабатываются измерительные системы, позволяющие с высокой чувствительностью определять амплитудные и фазовые характеристики связных и радиолокационных систем в частотных диапазонах от 1 до 180 ГГц. Измерение амплитудных шумов производится на основе малошумящих детекторов при входной мощности 100 мкВт. Измерение фазовых шумов осуществляется на основе двухканальной схемы частотного дискриминатора при входной мощности 1 мВт. Основные технические характеристики: частотный диапазон от 1 до 118 ГГц (9 моделей); чувствительность измерения на частоте отстройки от несущей, равной 10 кГц, составляет:

- при измерении амплитудных шумов от –150 дБ/Гц до –165 дБ/Гц в зависимости от модели;
- при измерении фазовых шумов от –110 дБ/Гц до –145 дБ/Гц.

Разрабатываются системы для измерения параметров различных диэлектрических материалов. Интенсивно ведутся работы по созданию новых типов линий передачи, работающих на новых физических принципах.

Высокодобротные СВЧ-резонаторы с разреженным спектром собственных колебаний

Особое место среди СВЧ-элементов всегда занимали высокодобротные СВЧ-резонаторы, используемые для стабилизации частоты генераторов, в качестве волномеров, фильтров, при измерении спектральных и флуктуационных характеристик сигналов, физических параметров материалов.

В СВЧ-диапазоне широко применяются различные типы резонаторов: коаксиальные, цилиндрические, открытые и т. д. [4–6]. Они осуществляют накопление энергии электромагнитного поля в некотором ограниченном объеме про-

странства, частотную селекцию, стабилизацию частоты генераторов и т. д. Основные требования, обычно предъявляемые к резонаторам: высокая собственная добротность, широкий диапазон перестройки (при отсутствии мешающих и вырожденных типов колебаний), возможность согласования со стандартными волноводами в диапазоне перестройки без подрегулировки элемента связи в процессе перестройки [7].

Нами исследованы «многомодовые» цилиндрические (см. рис. 1) резонаторы.

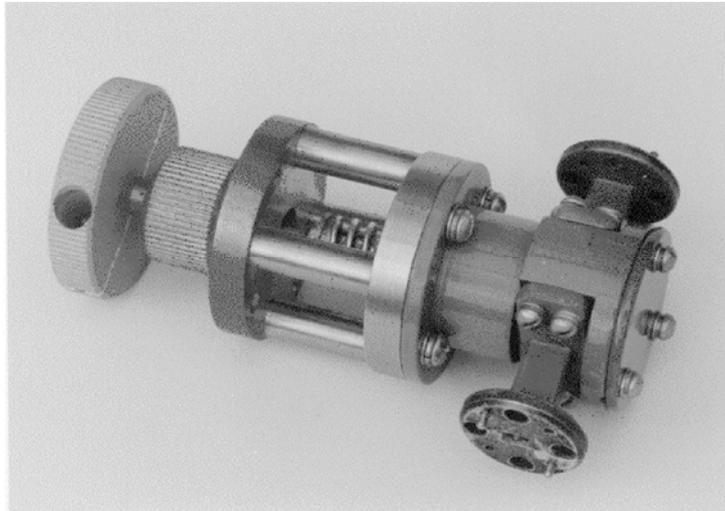


Рис. 1. Высокодобротный широкодиапазонный цилиндрический резонатор

Расчет цилиндрических резонаторов проводился по диаграмме типов колебаний:

$$(f_p D)^2 = (c x_{lm} / \pi)^2 + (c n / 2)^2 (D / L)^2,$$

где f_p – резонансная частота; c – скорость света; D и L – диаметр и длина резонатора; n – число полуволн, укладываемых вдоль оси резонатора; x_{lm} – значение корней бесселевых функций для E -колебаний или их производных для H -колебаний [8–9].

Рассмотрена строгая методика электродинамического расчета собственных E_{0np} -колебаний цилиндрического резонатора с коаксиальным выступом при учете конечной проводимости стенок [10–11]. Анализ выполнялся модифицированным методом вычетов, распространенным на задачи о собственных колебаниях. Получено аналитическое соотношение для собственной добротности:

$$q = \frac{2 [(p + 1/2) \pi + \gamma(k_0)] \ln(1/x)}{(1+x) [(p + 1/2) \pi + \varepsilon(k_0)] / k_0 b x + 2 \ln(1/x) (1 + k_0^2 b^2 \beta(k_0))},$$

где $q = k_0 \Delta_0 Q$ (Q – собственная добротность, Δ_0 – толщина скин-слоя материала резонатора); $x = a / b$; $p = 1, 2, \dots$.

Зависимость q (сплошная линия) и $x = k_0 b$ (пунктирная линия) от L/b для колебаний E_{010} приведена на рис. 2.



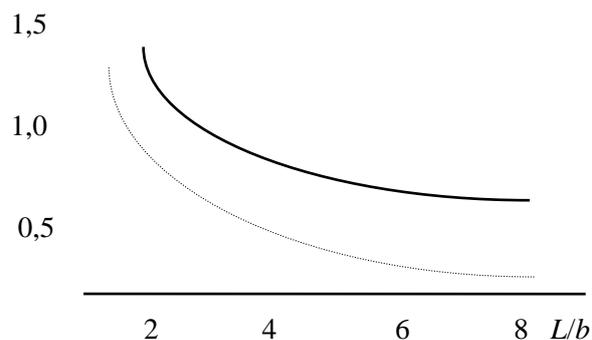


Рис. 2. Зависимость q и x от L/b для E_{010} -колебаний

В диапазоне частот 32–405 ГГц предложен новый тип резонатора – гребенчатый резонатор, основанный на эффекте аномально малого затухания H – поляризованных волн в гофрированных структурах [12–14]. Резонатор представлен на рис. 3.

Рабочими колебаниями данного резонатора являются моды типа E_{0mn} , представляющие собой суперпозицию прямого и встречного волновых пучков с аксиальной симметрией, электрически поляризованных вдоль гребней периодической структуры. Выигрыш в поглощении гребенчатой поверхности по сравнению с гладкой будет иметь место для волновых пучков, угол скольжения q которых над поверхностью достаточно мал, а λ не близко к $2D$, где D – глубина канавки. При выполнении условия $L > b$ потери в боковой поверхности являются преобладающими, а их уменьшение за счет гофрировки значительно меняет полную добротность. Получено соотношение для собственной добротности гребенчатого резонатора:

$$1/Q = 2 \operatorname{Re} Z_0 [2 + L (1 + D/d) \beta \operatorname{Cos}^2 \theta / b] / W_0 n \pi,$$

где $\beta = \operatorname{Re} Z_{01} / \operatorname{Re} Z_0$, Z_0 , Z_{01} – соответственно поверхностные импедансы торцевых и боковых поверхностей; D и d – глубина и период гребенки; $W = 120 \pi \text{ Ом}$.

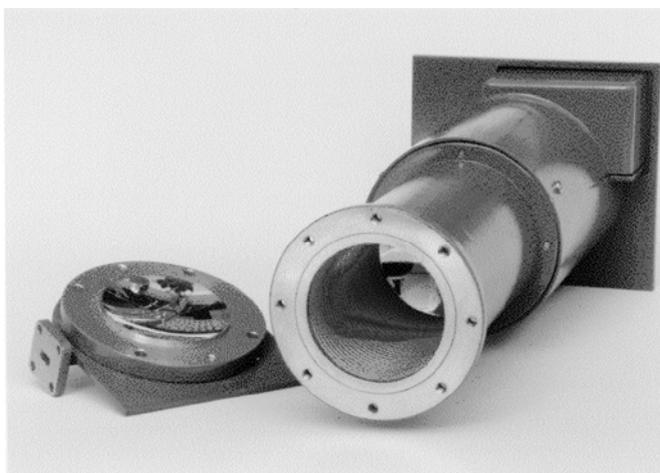


Рис. 3. Высокодобротный гребенчатый резонатор

В области создания новых физических механизмов повышения добротности и исследования принципов широкополосных элементов связи высокодобротных резонаторов со стандартными волноводами нами разработаны методики расчета широкополосных элементов связи высокодобротных резонаторов с одномодовыми волноводами. Рассчитана связь открытого резонатора со сферическими зеркалами круговой формы и прямоугольного волновода на волне H_{10} через диафрагму с малым круговым отверстием [15]. Расчет выполнялся в дипольном приближении. В тензоре магнитной поляризуемости отверстия связи учтено влияние стенок волновода.

$$Q_{\text{св}} = \frac{a b l^2 L^2}{32 \pi M^2 \sqrt{1 - (\lambda / 2 a)} \sqrt{L(1 - L / 2 r_0) / 2 r_0}},$$

где M – коэффициент магнитной поляризуемости; L – расстояние между зеркалами; r_0 – радиус кривизны зеркал.

Разработана методика расчета диафрагмы с двумя близко расположенными малыми круговыми отверстиями [16]. Тензор поляризуемости такой структуры рассчитывался с учетом взаимного влияния отверстий. Задача о магнитной поляризуемости двух круглых отверстий в плоском экране рассматривалась при помощи метода парных интегральных уравнений. Ее решение было сведено к системе интегральных уравнений Фредгольма для вспомогательных функций. Получены простые аналитические соотношения для тензоров поляризуемости с учетом их взаимного влияния.

Предложен расчет связи волновода с резонатором через плавные волноводные переходы [17–18] на основе олинеровской модели, до этого применявшейся для расчета неоднородностей микрополосковых линий. В рамках этой модели реальный элемент связи заменен его прототипом, в котором вместо узких «электрических» стенок используются «магнитные» стенки. Размер широкой стенки прототипа

$$b_{\text{eff}} = b \nu, \text{ где } \nu = [1 - (\lambda / b)^2]^{1/2}.$$

Рабочие колебания ТЕМ в резонаторе не меняют структуру поля, оттого что «магнитные» стенки продолжены в резонатор. Эта модель позволила вычислить мощность в волноводе и определить коэффициент передачи из решения ключевой двумерной задачи дифракции на открытом конце плавнонерегулярного волновода с фланцем:

$$Q_{\text{св}} = \frac{L^2}{a \nu a_0 b k T_0 k^2} \left(\frac{L}{R} \left(1 - \frac{L}{aR} \right) \right)^{-1/2},$$

где L – расстояние между зеркалами; R – радиус кривизны зеркал; a – коэффициент, зависящий от типа резонатора; $\nu = [1 - (\lambda / 2b)^2]^{1/2}$; T_0 – коэффициент передачи, определяемый из решения двумерной задачи [19].

Технологические трудности изготовления бездиафрагменных элементов связи резко возрастают с укорочением длины волны. Поэтому представляет интерес использование в качестве элемента связи полупрозрачной решетки, нане-

сенной на диэлектрическую подложку [20]. Такие элементы связи изготавливаются на основе интегральной технологии. Разработана методика расчета $Q_{св}$ этих элементов связи.

$$Q_{св} = \frac{a b \lambda^2 L^2}{32 \pi \beta M_{эфф} \sqrt{1 - (\lambda/2a)^2} \sqrt{L/2 r_0} (1 - L/2 r_0)},$$

где a и b – размеры выходного волновода; r_0 – радиус кривизны зеркал;

$$M_{эфф} = \frac{\pi}{16} \frac{4a^2 c}{2d} \sum_{p=1}^N 2d \sin \pi (xp + 2pd) / d,$$

где N – число щелей в решетке.

На основе выполненных теоретических исследований разработан универсальный комплект широкодиапазонных измерительных резонаторов в диапазоне частот 0,6–405 ГГц [21]. Основные технические характеристики этого комплекта приведены в табл. 1.

Исследованные принципы согласования многомодовых резонаторов и стандартных волноводов использованы при разработке СВЧ-устройств, работающих на основе микроволновой технологии нагрева.

Таблица 1

Комплект широкодиапазонных измерительных резонаторов

Модель	Частотный диапазон (ГГц)	Тип резонатора	Тип выхода	Добротность (min)	кскв (max)	Вес, кг
PBO101	32,00–53,57	открытый	волноводный	60000	1,65	5,5
PBO111	53,57–78,33			66000	1,70	6,0
PBO121	78,33–118,1	цилиндрический		75000	1,70	4,1
PBO131	118,1–178,4			75000	1,90	3,7
PBC501	17,44–21,60			42000	1,80	2,1
PBC511	21,60–25,95	гребенчатый		48000	1,90	2,0
PBC521	25,95–32,00			45000	2,00	1,7
PBC531	32,00–37,50			45000	2,00	1,6
PBG531	32,00–37,50	цилиндрический		60000	1,65	4,5
PBG541	37,50–47,00			60000	1,65	3,5
PBG551	47,00–53,57	неоднородный	коаксиальный	60000	1,60	3,3
PBC311	2,00–3,00			18000	1,60	8,7
PBC321	3,00–4,00			24000	1,60	13,7
PBC331	4,00–5,20			51000	1,60	11,2
PBC371	4,90–5,64			57000	1,60	9,5
PBC401	5,64–7,20			42000	1,60	6,5
PBC411	6,93–8,15			42000	1,60	5,4
PBC421	7,60–9,80			45000	1,50	5,5
PBC451	9,40–12,05			45000	1,80	4,5
PBC061	8,15–12,05			42000	1,60	6,6
PBC461	12,05–15,40	42000	1,95	3,7		
PBC481	15,40–17,44	42000	1,95	3,5		
PBC071	12,05–17,44	42000	1,80	5,1		
PBC241	0,60–1,20	10000	1,20	4,5		
PBC251	1,07–2,14	10000	1,60	3,8		

Стерилизация почвы в тепличных хозяйствах

Овощеводство защищенного грунта в значительной мере получило развитие за счет строительства крупноблочных теплиц и создания специализированных тепличных хозяйств. Одновременно происходит перевод выращивания тепличных культур на промышленную основу с применением новых технологий, видов растений, сортов и гибридов. В этих условиях необходим поиск новых решений при проведении мероприятий по защите растений от вредителей и болезней.

Большой ассортимент овощных культур, работа крупных тепличных комбинатов в течение круглого года практически исключают возможность уничтожения в период зимних холодов устойчивых к пестицидам популяций вредителей, болезней и одновременно снижают эффективность профилактических мероприятий, проводимых в теплицах по окончании вегетации растений. Основной причиной потерь урожая овощных культур (до 50–70 %) являются болезни и вредители, иногда они приводят к полной гибели растений. Специалисты вынуждены увеличивать как кратность обработок растений акарицидами, инсектицидами и фунгицидами, так и нормы расхода препаратов. Все это приводит к накоплению остатков пестицидов и их токсичных метаболитов в почве, растениях, плодах, резкому ухудшению условий труда рабочих в теплицах.

Наиболее вредоносными и распространенными вредителями и болезнями овощных культур являются паутинный клещ, тепличная белокрылка, тли, трипсы, галловая нематода, серая, белая и корневая гнили, бактериозы. Для этих вредителей и патогенных микроорганизмов местом обитания и сохранения является почва. Поражение томатов бактериозами особенно усилилось за последние 5–6 лет. Это связано с тем, что для выращивания овощной продукции приобретаются семена голландской селекции, которые являются одним из основных источников бактериальной инфекции. Вредоносность бактериозов проявляется в снижении как количества, так и качества урожая. Бактериальный рак томатов часто поражает от 10 до 96 % растений. Не менее вредны и корневые гнили, вызывающие гибель 32–50 % растений, в некоторых случаях количество отмерших растений достигает 90 %. Причиной значительных потерь урожая являются также и вредители – белокрылка, тли, трипсы. Сложность борьбы с ними заключается в видовом многообразии вредителей, исключительно высоких темпах размножения, высокой плодовитости. Многие из вредителей, закончив питание, переселяются в почву, где превращаются в проницу и нимфу. Зимуют вредители в верхнем слое почвы. В последние годы во многих тепличных хозяйствах республики распространены и галловые нематоды, снижающие урожай огурцов и томатов до 40 %. Наиболее благоприятным условием для их развития является влажность почвы 40–60 %. Сухость почвы, как при высоких, так и при низких температурах, способствует гибели нематод.

До настоящего времени основными приемами уничтожения возбудителей болезней растений были химический метод и термическая обработка почвы. Приобретение химических препаратов для обработки почвы требует значительных валютных средств. Непременным условием получения высокой эффективности нематодцидов является правильное их применение и внесение в почву спе-

циальными машинами. Нынешнее состояние этого вопроса крайне неудовлетворительно. В имеющейся системе машин по защите растений нет ни одной для внесения фумигантов в почву. Термическая обработка трудоемка, дорога и требует больших расходов энергоресурсов – на 1 га обрабатываемой площади расходуется 110 тыс. м³ газа. При этом также остается необходимость применения нематодицидов.

Современная экономическая и экологическая ситуация в республике требует поиска и внедрения новых эффективных методов борьбы с почвенной и семенной инфекциями. Для решения этой проблемы в НИИ ЯП была разработана установка для стерилизации почвы в тепличных хозяйствах [22]. Использование этой установки позволило реализовать экологически чистую микроволновую технологию для борьбы с болезнями растений и стерилизации почвы. Эта технология основывается на стерилизующем эффекте СВЧ электромагнитных колебаний, который заключается в избирательном нагреве патогенных микроорганизмов, являющихся влажными диэлектриками. Возбудители болезней при СВЧ-воздействии погибают вследствие высокой скорости нарастания их температуры. За 1 с температура микроорганизмов повышается на 5–7 °С, при этом нагрев идет внутри организма. Регулируя время воздействия или интенсивность электромагнитного излучения, можно добиться полной стерилизации минеральных субстратов, используемых в настоящее время в современных технологиях выращивания овощной продукции.

Разработанная нами СВЧ-установка представляет собой объемный резонатор, способный накапливать электромагнитную энергию. Резонанс позволяет изменить соотношение между величинами напряженности электрического поля и подводимой мощностью в резонаторе и значительно интенсифицировать воздействие СВЧ-энергии на помещаемый в резонатор минеральный субстрат, который является диэлектрическим материалом с малыми потерями. Структурная схема установки представлена на рис. 4.

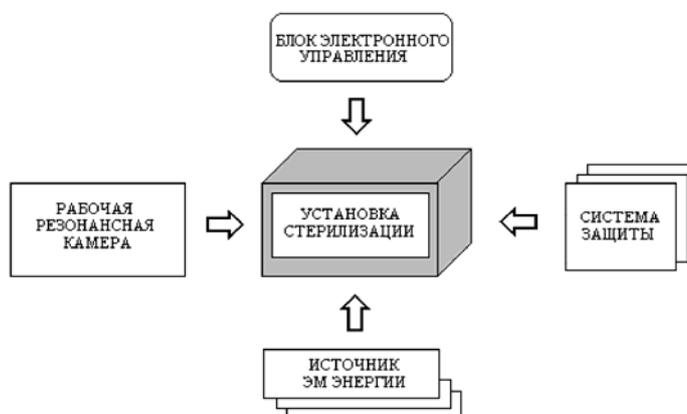


Рис. 4. Структурная схема установки для стерилизации грунтов

Резонанс достигается благодаря определенным фазовым соотношениям между подводимой волной и волнами, отраженными от волноводных элементов, ограничивающих полость собственно резонатора.

Основные характеристики объемного резонатора можно представить, воспользовавшись его эквивалентной RCL схемой (рис. 5).

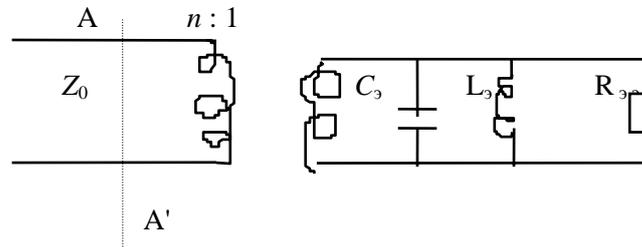


Рис. 5. Эквивалентная схема резонатора

При резонансе сопротивление в сечении AA' (случай недосвязи – в сечении AA' минимум стоячей волны) равно R_0 , для которого в работе [7] получено соотношение

$$\frac{R_0}{Z_0} = \left[\frac{1 - \sqrt{1 - k_c^2}}{1 + \sqrt{1 - k_c^2}} \right] \left[\frac{1 - e^{-a_l}}{1 - e^{a_l}} \right],$$

где Z_0 – характеристическое сопротивление; a_l – коэффициент затухания волны в резонаторе; k_c – коэффициент связи.

Связь резонатора с волноводом представлена на эквивалентной схеме в виде идеального трансформатора с соотношением витков $n : 1$, где

$$n^2 = \frac{1 - \sqrt{1 - k_c^2}}{1 + \sqrt{1 - k_c^2}}, \quad k_c = \sqrt{1 - e^{-2 a_l l}}.$$

Величины R_3 , L_3 , C_3 можно рассматривать как внутренние параметры самого резонатора, тогда как n^2 характеризует степень связи (форму, размер и положение отверстия).

Для резонатора, используемого в данной стерилизующей установке, выполнялось условие $2pD/l$, где D – наибольший размер резонатора. Так как в установке в качестве источника электромагнитных колебаний использовались магнетроны с рабочей частотой 2,45 ГГц, то и расчет геометрических размеров объемного резонатора проводился на данной частоте. Расчетные размеры камеры были следующие: $2200 \times 1600 \times 1400$ мм. В таком резонаторе, размеры которого значительно превосходят длину волны, существуют 64 типа колебаний. Это связано как с возможностью распространения различных типов волн, так и с возможностью различного их направления по отношению к стенкам резонатора. Для обеспечения большей равномерности распределения электромагнитного поля в многомодовом резонаторе использовали ряд мер, которые привели к тому, что коэффициент равномерности электромагнитного поля в камере равнялся 0,98. Прежде всего, наличие такого количества близких по частоте собственных

мод приводит к перекрытию резонансных кривых отдельных мод и, следовательно, к более гладкой кривой зависимости эквивалентного импеданса камеры от частоты. Это облегчает согласование генератора (магнетрона) с резонансной камерой. Чтобы возбудить в резонаторе необходимые виды колебаний с помощью прямоугольного волновода, ввод электромагнитной энергии размещали в области пучности магнитного поля соответствующей моды. Для увеличения числа возбуждаемых мод увеличили число вводов. В данной камере использовались три ввода и соответственно три магнетронных генератора типа М-135. В результате суммарная СВЧ-мощность в камере составляла 2,5 кВт. Для повышения равномерности распределения суммарного электромагнитного поля по объему камеры по внутренним боковым стенкам камеры расположены периодические структуры, которые осуществляют отжатие поля от стенок камеры. Физический механизм такого отжатия аналогичен отжатию поля от цилиндрических стенок в высокодобротных гребенчатых резонаторах.

Размеры камеры позволяют размещать в ней одновременно до 250 пакетов с грунтом. При такой загрузке режим работы камеры дает возможность в течение 12 ч нагреть содержимое каждого пакета до 90 °С .

Экспериментальные исследования проводились в тепличном хозяйстве колхоза им. Орджоникидзе Смолевичского района Минской области с участием Института защиты растений Академии аграрных наук Республики Беларусь. Для экспериментальных исследований использовали рассадные кубики и маты после выращивания огурца. опыты были заложены в 4-кратной повторности. Перед обработкой в микроволновой установке в кубиках и матах был проведен анализ корневой системы огурца на пораженность возбудителями болезней. В кубиках и матах из минеральной ваты были обнаружены споры аскохитоза, серой и корневой гнилей. После микроволновой стерилизации наблюдалась 100 % гибель спор обнаруженных возбудителей болезней.

Опытный образец установки изготовлен на заводе № 407 гражданской авиации, там же прошел все испытания по электрическим и конструктивным параметрам. Испытания проводились по методикам, приведенным в ОСТ 11 0367-86. Результаты испытаний показали, что опытный образец установки микроволновой стерилизации почвы может использоваться для борьбы с болезнями растений и стерилизации почвы в тепличном хозяйстве.

Результаты испытаний подтвердили высокую эффективность предлагаемого метода стерилизации, о чем свидетельствуют акты экспериментальных исследований. Этот метод был рекомендован для использования в производственных условиях.

Таким образом, разработана энергосберегающая высокоэффективная экологически чистая микроволновая технология стерилизации для малообъемной технологии выращивания овощной продукции, широко внедряемой в настоящее время в тепличных хозяйствах республики.

Микроволновая сушка древесины

Деревообрабатывающей промышленности Республики Беларусь требуется большое количество сухой и качественной древесины. Сушка древесины до влажности 6–15 % происходит в традиционных сушильных камерах при помощи внешнего агрессивного воздействия – температуры, пара, вакуума. При таком воздействии в первую очередь высыхают поверхностные слои древесины и, обезвоживая их, процесс сушки продвигается вглубь материала. В зоне соприкосновения слоев сухой и еще влажной древесины возникают противодействующие напряжения. В высушенной части древесины действует напряжение сжатия, а во влажной – напряжение растяжения. Кроме того, в сухом верхнем слое древесины сужаются капилляры, препятствуя тем самым свободному выходу влаги на поверхность. В результате в зоне напряжений происходит растрескивание или деформация материала. Для того чтобы избежать этого, в традиционных сушильных камерах используют мягкие режимы сушки и искусственное увлажнение, что увеличивает сроки и удорожает процесс сушки, особенно для древесины твердых пород.

Повысить производительность процесса сушки и качество материала возможно лишь в том случае, если древесина одновременно и равномерно прогревается по всему объему. Это достигается только в сушильных камерах, работающих по принципу диэлектрического нагрева. Здесь отсутствует теплоноситель, на нагрев которого необходимы энергозатраты, а СВЧ-излучение, проникающее во всю глубину древесины, вытесняет влагу по открытым капиллярам на поверхность, откуда она удаляется воздушными тепловентиляторами.

Основные преимущества применения СВЧ-энергии следующие.

- Будучи влажным материалом, древесина обладает очень высокой поглощаемостью СВЧ-излучения, которое обусловлено высоким значением коэффициента диэлектрических потерь воды, равного 81, в то время как у древесины он равен 16.
- Возможность подвести и выделить в единице объема древесины такую мощность, которая недоступна ни одному из традиционных способов подвода энергии. Энергия, выделяемая в древесине, пропорциональна частоте магнетрона, поэтому в 3-сантиметровом диапазоне длин волн будет выделяться (при одинаковой электрической напряженности) в 1000 раз больше энергии, чем в 10-метровом диапазоне.
- Возможность осуществить бесконтактный избирательный нагрев и получить требуемое распределение температур в древесине, саморегулирующийся нагрев, тепловая безынерционность (т. е. возможность мгновенного включения и выключения теплового воздействия на древесину). А отсюда и высокая точность регулирования нагрева.
- Практически 100 % КПД преобразования СВЧ-энергии в тепловую, выделяемую в нагреваемом материале, низкие потери энергии в подводящих трактах и рабочих камерах.

Основные задачи при расчете и конструировании рабочих камер для микроволновых сушилок состоят в согласовании рабочей полосы камеры и магне-

тронов и обеспечении необходимой равномерности нагрева обрабатываемой древесины.

Следует отметить, что при большой загрузке добротность рабочей камеры падает и согласование ввода энергии с резонаторной камерой перестает быть проблемой, а равномерность нагрева определяется способом облучения нагреваемого материала. В случае слабой загрузки рабочей камеры ее можно рассматривать как резонатор без потерь. Существенное увеличение равномерности нагрева обрабатываемого материала возможно при использовании для возбуждения рабочей камеры нескольких магнетронов. Кроме того, так как линейные размеры резонатора, примененного в качестве рабочей камеры в микроволновой сушилке, во много раз превышают длину волны магнетронов, то в резонаторе, которым является внутренняя камера сушилки, можно возбудить несколько собственных видов колебаний, имеющих различное расположение узлов и пучностей электрического поля, что приводит к существенному увеличению равномерности нагрева обрабатываемого диэлектрика. Расположение в пределах рабочей полосы магнетрона многих близких по частоте собственных видов колебаний приводит также к перекрытию резонансных кривых отдельных резонансов и, следовательно, к более гладкой зависимости импеданса от частоты, что облегчает согласование магнетрона со слабозагруженным резонатором.

Кроме того, предложено увеличить равномерность нагрева использованием для возбуждения нескольких магнетронов.

Расчет многомодовых прямоугольных резонаторных камер для устройств СВЧ-сушки. Длины волн собственных колебаний прямоугольного резонатора определяются равенством

$$\lambda = \frac{1}{\sqrt{(m/2a)^2 + (n/2b)^2 + (l/2c)^2}},$$

где m, n, l – произвольные целые числа; a, b, c – линейные размеры резонатора.

Рассчитаны 4 модели резонансных камер для сушки диэлектрика. Результаты расчетов приведены в табл. 2.

Таблица 2

Размеры резонансных камер для сушки диэлектрика

№ модели	a	b	c	g	h	g ₁	h ₁
1	1700	850	850	337	337	337	337
2	2550	850	850	398	275	398	275
3	2550	1700	1700	1244	456	456	394
4	3400	1700	1700	1244	456	470	425

Чтобы возбудить в резонаторе необходимые виды колебаний с помощью прямоугольного волновода, необходимо знать распределение тангенциальных компонент магнитного поля видов колебаний у той стенки резонатора, к которой присоединяется ввод энергии. Помещая ввод энергии в пучность магнитного поля, можно возбудить определенный вид колебаний. Мы применяли несколько вводов (в зависимости от модели). По два – для моделей № 1 и 2, и по четыре –

для моделей № 3 и 4. Для предотвращения перекачивания энергии из одного ввода в другой обеспечивали развязку между ними. Такую развязку получили, располагая каждый ввод энергии вблизи узла магнитного поля вида колебаний, возбуждаемого другим вводом.

Для правильного выбора месторасположения вводов электромагнитной энергии в резонансную камеру рассматривалось распределение максимумов магнитного поля отдельных видов колебаний. Распределение тангенциальной составляющей магнитного поля на стенке $x = 0$ имеет следующий вид:

для колебаний типа E

$$\begin{aligned} H_x &= 0, \\ H_y &= \sin(n\pi y/b) \cos(\pi z/c), \\ H_z &= 0; \end{aligned}$$

для колебаний типа H

$$\begin{aligned} H_x &= 0, \\ H_y &= [p m \pi^2 \sin(n\pi y/b) \cos(\pi z/c) / b c] / (k^2 - mn/c)^2, \\ H_z &= \cos(\pi y/b) \sin(m\pi z/c), \end{aligned}$$

где $k = 2\pi/\lambda$.

Из вышеприведенных формул видно, что ввод энергии, в котором существует только компонента магнитного поля (прямоугольный волновод на волне H_{10}), может возбудить в резонаторе колебания как типа E , так и типа H . При этом компоненты магнитного поля, направленные вдоль оси Z резонатора, возбуждают только колебания типа H . Поэтому соотношение амплитуд и количество возбуждаемых типов колебаний E и H подбирались возбуждением двумя волноводами с взаимно ортогональной поляризацией поля. Основные технические характеристики СВЧ-сушилок помещены в табл. 3.

Таблица 3

Основные технические характеристики СВЧ-сушилок

Область применения	Сушка пиломатериалов
Принцип действия	Комбинированный диэлектрический и конвективный нагрев
Объем рабочей камеры	От 1 м ³ до 10 м ³
Производительность	Снижение влажности в сутки в зависимости от режима сушки, сорта и размера пиломатериалов от 1,5 до 6 %
Конечная влажность	Не более 10 %
Потребляемая мощность	Не более 8 кВт
Максимальная толщина пиломатериалов	Не более 60 мм
Масса	Не более 1300 кг

Процесс СВЧ-нагрева в разработанных сушилках характеризуется высокой производительностью, тепловой безынерционностью, высоким качеством высушиваемого материала, экономичностью, а также возможностью сушки как исходного пиломатериала, так и непосредственно полуфабриката (заготовок).

Экспериментальное исследование электродинамических характеристик биологических объектов на примере семян овощных культур

Для экспериментального подтверждения проведенных теоретических исследований Институт ядерных проблем и лаборатория защиты овощных культур БелНИИ защиты растений провели исследования по обеззараживанию семян овощных культур путем их обработки СВЧ.

Для постановки эксперимента был создан макет установки для микроволновой обработки семян различных сельскохозяйственных культур в широком частотном диапазоне (от 37 до 120 ГГц) с плавной регулировкой мощности от 1 до 10 мВт.

Исследовалось влияние микроволнового низкоинтенсивного излучения на посевные качества, на рост и развитие растений в онтогенезе культуры. С этой целью семена были обработаны на макете экспериментальной установки в режимах 1–4, а затем в чашках Петри в лабораторных условиях проращивались. Определяли лабораторную всхожесть и снижение пораженности фитопатогенами.

На семенах лука-чернушки («Голландский желтый») при всех режимах обработки повышалась лабораторная всхожесть (75,7; 74,3; 70,5; 67,5 %) относительно контроля (51,0 %) и эталона ТМТД (51,0 %), снижалась пораженность альтернариозом, стемфилиозом, мукором с 2,0 % в контроле до 0,5 % в варианте с режимом 4.

На семенах капусты («Подарок») результативной оказалась обработка семян в режимах 1 и 4, повышающая всхожесть до 98,0; 98,7 % по сравнению с контролем – 95,2 % и эталоном ТМТД – 95,7 % и снижающая пораженность альтернариозом с 4,8 % в контроле до 2,0–0,3 %.

Лабораторная всхожесть семян томатов («Слава Молдовы») повышалась во всех вариантах (90,5–95,7 %) относительно контроля (89,7 %) и эталона (70,3 %). Пораженность комплексом болезней в режимах 1–4 снизилась до 6,0–3,8 % по сравнению с контролем – 10,3 %.

Лабораторная всхожесть семян моркови («Нантская») повышалась в режимах 2 и 4 (73,2; 72,5 %) относительно контроля (69,2 %) и эталона (68,0 %), пораженность альтернариозом снижалась с 4,3 % в режиме 2 до 3,5 % в режимах 3 и 4 и до 1,8 % в режиме 1 относительно контроля – 12,5 %.

Таким образом, проведенные исследования показывают, что воздействие СВЧ улучшает посевные качества семян капусты, моркови, лука-чернушки, томата и снижает пораженность фитопатогенным комплексом (альтернариозом, макроспориозом, бактериозом, стемфилиозом, мукором) [23].

Были проведены и экспериментальные работы по исследованию резонансного воздействия электромагнитных волн низкой интенсивности на семена томатов и огурцов в теплицах Института защиты растений. Данные опытов показали, что лабораторная всхожесть семян огурца (сорт «Изящный») относительно контроля была выше на 3,5 %. При этом при проведении фитопатологической экспертизы на обработанных семенах возбудителей грибных болезней не выявлено.

Контроль за дальнейшим ростом и развитием растений в онтогенезе культуры, фитосанитарной ситуацией осуществлялся в изолированном боксе. Пророщенные семена высевались в почву, помещенную в горшки. В каждом варианте (было рассмотрено 4 варианта обработки, которые соответствовали 4 стандартным частотным диапазонам миллиметровых волн, и один контрольный) было по 20 горшков и 40 растений.

Результаты исследований свидетельствуют о том, что микроволновая обработка семян достоверно увеличивает площадь листа растений от 37 до 62 %, а длину стебля – от 35 до 58 % относительно контроля. При этом наблюдалась 100 % всхожесть семян.

Кроме того, в целях разработки новой эффективной экологически безопасной и низкоэнергетической биотехнологии предпосевной обработки семян овощных культур в Республике Беларусь проводились экспериментальные исследования с Белорусским НИИ овощеводства по воздействию низкоинтенсивного микроволнового электромагнитного излучения на семена овощных культур. Семена обрабатывались в различных режимах, а затем высевались в тепличных боксах НИИ овощеводства. Результаты опытов следующие:

1) на семенах капусты «Белорусская» полевая всхожесть в режимах 1 и 3 повышалась до 82 % по сравнению с контролем – 62 %;

2) на семенах капусты «Русиновская» полевая всхожесть в режиме 1 – 97,5 %, в контроле – 62 %;

3) на семенах свеклы полевая всхожесть в режиме 3 – 97 %, в контроле – 89 %;

4) на семенах моркови в режиме 1 – 55,5 %, в контроле – 48 %;

5) на семенах лука в режиме 1 – 63 %, в контроле – 54 %;

6) на семенах томатов в режиме 1 – 92 %, в контроле – 78 %;

7) на семенах огурца в режиме 1 – 97 %, в контроле – 81 %.

Полученные биометрические характеристики растений показали, что биофизическая обработка семян оказывает стимулирующее воздействие во всех режимах по сравнению с контролем, но предпочтительнее оказывается режим 1.

Таким образом, результаты проведенных исследований позволяют утверждать, что воздействие низкоинтенсивного микроволнового излучения улучшает посевные качества семян капусты, свеклы, моркови, лука, томатов и огурцов, снижает пораженность семян фитопатогенным комплексом. Из этого следует вывод, что метод резонансного воздействия электромагнитных волн низкой интенсивности СВЧ-диапазона на семена овощных культур является перспективным экологически безопасным технологическим приемом предпосевной обработки семян овощных культур.

Экспериментально подтверждено, что зависимость эффекта от частоты СВЧ-излучения, действующего на семена, носит резонансный характер. Наблюдаемые эффекты не зависели от времени воздействия и от плотности потока энергии.

Основываясь на вышеизложенных результатах теоретических и экспериментальных исследований воздействия электромагнитных полей на биологические объекты, можно сделать первоначальные выводы о механизмах этого воздействия.

Проанализированы различные методы нелинейной электродинамики для формулировки математической модели взаимодействия. Проведен электродинамический расчет клеточной мембраны как многомодовой нелинейной электродинамической структуры. Сформулирована математическая модель мембраны как системы связанных нелинейных осцилляторов, причем нелинейными являются не только резонансные частоты, но и параметры диссипации. Показано, что эффекты в миллиметровом диапазоне носят мультирезонансный характер: резонансные частоты $f = 60, 75, 94, 118$ ГГц.

Проведенные лабораторные исследования воздействия электромагнитных колебаний СВЧ-диапазона на семена овощных культур подтверждают направленное влияние электромагнитного излучения на характер развития семян и сводятся к управлению происходящими в семенах восстановительными процессами, нарушенными вследствие семенной инфекции, к активации процессов биосинтеза и деления клеток.

Полученные результаты открывают широкую возможность для новых исследований в области биофизики и клеточной медицины. Дальнейшее изучение механизмов взаимодействия клеток между собой и внутреннего взаимодействия мембран с ядрами поможет понять физику взаимодействия элементарных объектов живого организма, имеющего практическое значение для медицины.

Литература

1. Karnal A. K. // L'Onde Electrique. 1989. Vol. 69, № 6. P. 70–77.
2. Olver A. D. // IEEE Proc. Pt.F. 1989. Vol. 136, № 1. P. 35–52.
3. Видулов И. К. // Электронная техника. Сер.1. Электроника СВЧ. 1992, вып. 5. С. 3–8.
4. Власов В. И., Берман Я. И. Проектирование высокочастотных узлов радиолокационных станций. Л., 1978.
5. Вайнштейн Л. А. Открытые резонаторы и открытые волноводы. М., 1966.
6. Вайнштейн Л. А., Маненков А. Б. // РЭ. 1975. Т. 18, № 9. С. 1777–1781.
7. Альтман Л. Устройства сверхвысоких частот. М., 1969.
8. Rodionova V. N., Slepyan A. Ya., Slepyan G. Ya. // XXIII General Assembly of Intern. Union of Radio Science: Abstracts. Hungary, 1992. Vol. 2. P. 344.
9. Копусов В. Н., Родионова В. Н. Перестраиваемый СВЧ-резонатор. Патент России № 1741201 от 10.01.93.
10. Родионова В. Н., Слепян Г. Я. // РЭ. 1986. Т. 31, № 10. С. 1915–1921.
11. Родионова В. Н., Слепян Г. Я., Лук Л. Н. Коаксиальный диэлектрический резонатор. А. с. 1327241 от 18.11.85.
12. Лук Л. Н., Родионова В. Н., Слепян Г. Я. // ЖТФ. 1988. Т. 58, вып. 3. С. 594–596.
13. Родионова В. Н., Слепян Г. Я. // РЭ. 1989. Т. 34, № 8. С. 1767–1769.

14. Rodionova V. N., Slepyan G. Ya. // СРЕМ'94. Abstracts-Boulder, USA. 1994. P. 35.
15. Родионова В. Н., Слепян Г. Я. // РЭ. 1989. Т. 34, вып. 7. С. 1358–1365.
16. Родионова В. Н., Слепян Г. Я. // РЭ. 1991. Т. 36, вып. 8. С. 1382–1385.
17. Kuraev A. A., Natarov M. P., Rodionova V. N., Slepyan G. Ya. // Intern. J. Electron. 1991. Vol. 70, № 5. P. 1005–1014.
18. Родионова В. Н., Резникова Е. М. Устройство связи объемного резонатора. А. с. 1262608 от 02.08.84.
19. Rodionova V. N., Slepyan G. Ya. // Electron. Letters. 1991. Vol. 27, № 16. P. 1427–1428.
20. Natarov M. P., Popkova T. L., Rodionova V. N., Slepyan G. Ya. // J. of Com. Techn. And Electron. 1994. № 39. P. 39–45.
21. Rodionova V. N., Slepyan G. Ya. // IGARS-91. Intern. Geoscience and Remote Sensing Symposium: Abstracts. Finland, Helsinki, 1991. P. 146.
22. Карпович В. А., Родионова В. Н., Слепян Г. Я. // Международный аграрный журнал. 1999. № 5. С. 29–30.
23. Карпович В. А., Родионова В. Н., Слепян Г. Я., Новикова О. Т. // Международный аграрный журнал. 200. № 3. С. 8–10.

RESEARCH, DESIGN AND DEVELOPMENT IN MICROWAVES: RESONANCE SYSTEMS, DEVICES AND EQUIPMENT

V. N. Rodionova, V. A. Karpovich, G. Ya. Slepyan

We suggest our services in designing and manufacturing microwave devices and components with the needed performances in different frequency ranges and waveguide channels.

We work in the field of microwave technique approximately 25 years. We design and manufacture noise measurement systems for high sensitivity measurement of amplitude and phase noise of components of radar and communication systems (oscillators, local oscillators, amplifiers, mixers) at frequency range from 1 to 180 GHz. For this purpose we worked out microwave components (coaxial, microstrip, waveguide) in this frequency range: resonators, detectors, mixers, local oscillators, attenuators, phase shifters, directional couplers, switches, matched load and others. The main advantages of this components are wide frequency range, small insertion loss, low noise level of oscillators, very high Q-factor of resonators.

Except to outlined microwave components we may propose microwave measurement system for: measuring of phase and amplitude noise of microwave signals, measuring of dielectric parameters of various materials and so on as cm- and mm-wave range (1...180 GHz) as submm-wave range (180–405 GHz).

The high Q-factor resonators are used to make the high-quality generators of the radar and navigation systems, to carry out the spectrum and frequency measurements, to measure the material parameters, to carry out the physical investigations.

The microwave resonators are applied at the microwave electronic: the resonance and stabilization generator systems, at the measurement technique: wavemeters, filters, signal spectrum measurement systems, frequency discriminators, at the experimental physics: spectroscopy, material parameter measurement systems; as well at the elementary particles accelerators, golography, radioastronomy, etc.

Main technical parameters are : frequency range 0.6...180 GHz; Q-factor 60 000...100 000; VSWR <1.5; resonator types (23 models) cylindrical, coaxial, cylindrical, open quasyoptical, corrugated.

The resonators are made of thermostable material, the inside surface – silver or gold. They have small weight and dimensions. There is the electronic tuning of frequency.

The quality of the radar and communication systems is mainly determined by the noise characteristics of their components – oscillators, local oscillators, amplifiers, mixers.

We propose the noise measurement systems to make high sensitivity measurement of the amplitude and phase noise of the radar and communication systems components oscillators, amplifiers, mixers. The amplitude noise measurement is realized in the circuitry of the microwave amplitude detector with the input power – 100 mW. The phase noise measurement is realized in the circuitry of the two-channel frequency discriminator with the input power – 1 mW.

Main technical parameters are the followings:

- the frequency range: from 1.0 to 118.1 GHz (9 models);
- the sensitivity of measurement at the 10 kHz offset frequency
 - for amplitude noise: from minus 150 dB/Hz to minus 165 dB/Hz for the various models,
 - for phase noise: from minus 110 dB/Hz to minus 145 dB/Hz for the various models;
- input microwave power
 - for the amplitude noise measurement: from 100 mW,
 - for the phase noise measurement: from 1 mW.

The preliminary investigations made in the Research Institute for Nuclear Problems of Belarussian State University demonstrates that application of microwave energy makes it possible:

- a) to destroy of the seed and infection diseases (Corinobacterium, Fusarium oxysporum, Botritis cineerea, Sclerotinia sclerotinian and others);
- b) to increase of the seed germinating power;
- c) to sterilize of the soil and mineral substrate used in the hothouse for growing of tomatoes, cucumbers, peppers, flowers, etc., therewith the soil ferment activity is preserved;
- d) to increase the yield capacity tomatoes, cucumbers, peppers, etc. (10–15 %)

For some years we have engaged in doing research in to the creation of microwave technology of before-sowing processing of the seeds of the vegetable crops (tomatoes, cucumbers, cabbages and others). This microwave technology makes it possible:

- to destroy the seed infection diseases;
- to increase the seed germinating power;
- to augment the photosintez apparatus of the plants;
- helps quicker growth of the plants;
- to increase the yield capacity.

The basis for this technology is the information influence of the low level power microwave energy on the biological objects. This influence allows to raise the seed germinating power and the plant immunity. Application of the microwave energy for the seed the productivity has increased on 10–12 %. New effective biotechnology of the before sowing seed treatment is ecologically safe and it needs a little of energy. Nowadays low intensity of the technology of the before sowing processing of the seeds of the vegetable crops is the successfully application from processed seeds in the Belorussian hothouse farms.

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ МОНТЕ-КАРЛО В ПРОБЛЕМЕ ЮСТИРОВКИ ВРЕМЯПРОЛЕТНЫХ НЕЙТРОННЫХ СПЕКТРОМЕТРОВ

Г. Д. Бокучава*, **Е. С. Кузьмин***, **И. С. Кутень****,
С. А. Кутень***, **В. В. Жук***, **А. А. Хрущинский*****

* *Объединенный институт ядерных исследований, г. Дубна*

** *Институт физики НАН Беларуси, г. Минск*

*** *НИИ ядерных проблем Белгосуниверситета, г. Минск*

Изучение свойств вещества в настоящее время немислимо без рентгеновской, электронной или нейтронной дифрактометрии. Особенности взаимодействия тепловых и холодных нейтронов с веществом, в частности их большая проникающая способность и длина волны порядка 1–10 Å, соответствующая характерным межатомным расстояниям, обусловили широкое распространение нейтронной дифрактометрии как метода исследования физики конденсированного состояния [1]. Классическим прибором для этих целей является времяпролетный нейтронный спектрометр, в котором осуществляется регистрация нейтронов по времени пролета определенного расстояния.

В последнее время расширяется круг вопросов, связанных со структурными исследованиями, который может быть решен с помощью нейтронной дифрактометрии, особенно после создания финскими и советскими специалистами так называемых фурье-спектрометров [2–4]. При этом одним из основных направлений применения является исследование внутренних механических напряжений в деталях конструкций и конструкционных материалов, в том числе и при внешних воздействиях [1, 5].

Начальным пунктом для слежения за нейтроном обычно служит вращающийся прерыватель, модулирующий поток тепловых нейтронов после замедлителя. Момент времени, соответствующий открытому состоянию прерывателя, считается началом отсчета времени пролета нейтронов. Нейтроны затем транспортируются к образцу, рассеиваются в нем по закону Брэгга и регистрируются детектором. Спектр времени пролета нейтронов от прерывателя до детектора несет в себе физическую информацию, по которой можно в определенной степени восстановить кристаллическую структуру образца.

Важнейшими характеристиками времяпролетного нейтронного спектрометра являются его разрешение и светосила. В общем случае временное разрешение зависит от многих факторов, таких как характеристики прерывателя, длина пролета нейтронов, угловой аксептанс нейтроновода, толщина чувствительной области детектора и ее форма, толщина образца, юстировка и пр. Увеличение разрешения спектрометра обычно влечет за собой резкое увеличение времени эксперимента. Поэтому, чтобы увеличить точность эксперимента, необходимо увеличивать светосилу прибора. Одним из методов увеличения светосилы является метод временной фокусировки на детекторе [6–8]. Увеличение светосилы детектора при сохранении временного разрешения спектрометра оказывается возможным благодаря использованию кинематических условий при

дифракции нейтронов в образце. Рассеяние на образце происходит по закону Вульфа – Брэгга и угол рассеяния θ однозначно связан с длиной волны нейтрона λ . Поскольку $\lambda \sim \sin(\theta/2)$ и скорости нейтронов по выходе из мишени распределены по закону $v \sim 1/\sin(\theta/2)$, то нейтроны разных энергий, стартующие с прерывателя в один момент времени, будут достигать детектора за разное время. Однако, если расположить детектор на линии так, что полный путь нейтрона от прерывателя до детектора $L \sim 1/\sin(\theta/2)$ (линия временной фокусировки), то нейтроны разных энергий, стартующие одновременно с линии прерывателя, придут, после их дифракции на одной и той же системе отражающих плоскостей в мишени, на детектор одновременно. Вращая линию временной фокусировки вокруг оси нейтронного пучка, можно получить поверхность временной фокусировки (ПВФ), на которой и должна лежать чувствительная поверхность детектора.

Поскольку на практике требуется массовое исследование образцов, то должны применяться приборы с большой светосилой, а следовательно, и с большими размерами детекторов. Большие размеры детекторов, с одной стороны, и высокое временное разрешение, с другой, предъявляют жесткие требования к юстировке детекторного блока спектрометра. В настоящей работе предлагается исследовать эти требования путем численного моделирования детекторного блока методом Монте-Карло.

Метод Монте-Карло в настоящее время – пока единственный метод, позволяющий достаточно точно учесть основную физику явлений при весьма сложной геометрии в задаче. Для его реализации использован пакет программ MCNP (Monte-Carlo Nuclear Particles) [9]. Все расчеты были проведены нами для нейтронного дифрактометра, работающего на линии с импульсным реактором на быстрых нейтронах ИБР-2 (г. Дубна, Россия)

В данной работе методом Монте-Карло рассчитана функция отклика детектора, выяснен вклад различных рассеивателей в ширину линии спектрометра, проведено сравнение с экспериментальными данными, полученными на ИБР-2.

1. Моделирование дифракции нейтронов методом Монте-Карло

Общий вид детектора по отношению к направлению нейтронного пучка (ось y) изображен на рис. 1. Исследуемый образец (мишень) расположен в начале координат. Детектор состоит из восьми секций, каждая из которых представляет собой набор (от трех до пяти) участков поверхностей конусов, аппроксимирующих ПВФ и имеющих ось симметрии вдоль направления пучка. Угловой обзор детектора составляет $70\text{--}110^\circ$. Секции покрыты защитной алюминиевой пленкой, расположенной перпендикулярно медиане секции. Материал детектора представляет собой органическое стекло (полиметилметакрилат) с равномерно распределенными в нем микрокристаллами $\text{ZnS}(\text{Ag})$ и Li^6F . Физика регистрации нейтронов основана на (n,α) -реакции с ядром ${}^6\text{Li}$. Вылетающая из ядра α -частица, имеющая энергию 4,78 МэВ, вызывает вспышку сцинтилляций в ZnS . Важнейшим достоинством сцинтиллятора является его нечувствительность к γ -излучению, что позволяет обходиться без громоздкой свинцовой защиты. В то же время низкая прозрачность к собственному излучению и наличие медленной

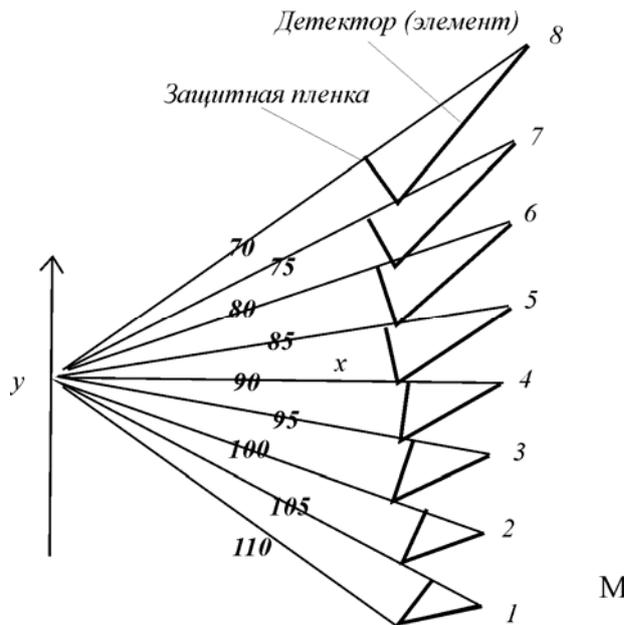


Рис. 1. Геометрия спектрометра: 70–110 (градусов) – угловые размеры детекторов (секций), М – точка юстировки первого детектора

компоненты во вспышке приводят к необходимости применения для регистрации специальной обработки светопульсов от нейтронов.

Классической схемой применения метода Монте-Карло к исследованию процессов прохождения частиц через вещество является схема «источник – детектор», т. е. в заданной точке (объеме) испускаются частицы, и затем прослеживается их путь до поглощения их в детекторе. Для решения задачи прохождения нейтронов через вещество использовался код MCNP.

Пакет предназначен для моделирования методом Монте-Карло процессов прохождения нейтронов, γ - и β -излучения через вещество. В MCNP не предусмотрено решение задач, связанных с когерентным рассеянием нейтронов на кристаллах. Поэтому мы не можем проследить полный путь нейтронов от прерывателя до детектора с учетом брэгговского рассеяния на мишени. Однако можно построить такой источник нейтронов, расположенный в общем случае в объемной мишени, который позволит рассчитать функцию отклика детектора как с учетом дифракции нейтронов на мишени, так и с учетом дрейфа нейтронов от прерывателя. Для каждого набора кристаллографических плоскостей будем рассматривать мишень как источник нейтронов с угловым и энергетическим распределением, жестко связанным условием Вульфа – Брэгга:

$$E(\theta) = n^2 * E_0 / \sin(\theta / 2), \quad (1)$$

где n – порядок дифракции, E_0 – зависящая от типа решетки постоянная:

$$E_0 = 0,5 * \pi^2 * \hbar^2 / (M_n * d)^2. \quad (2)$$

Здесь \hbar – постоянная Планка, M_n – масса нейтрона, d – расстояние между соответствующими отражающими плоскостями кристалла, θ – угол вылета нейтрона с энергией $E(\theta)$ из мишени по отношению к направлению падающего пучка. По азимутальному углу нейтроны распределены изотропно.

Модель дифракции для моделирования по методу Монте-Карло, основанная только на кинематической связи (1), наиболее адекватна случаю дифракции на поликристаллической мишени (только в этом случае нет необходимости учитывать эффекты первичной и вторичной экстинкции). Чтобы отразить время движения нейтрона в нейтронноводе от прерывателя до мишени, время старта нейтрона в мишени сдвигалось на это время. Такой источник нейтронов, моделирующий брэгговское рассеяние на поликристаллических мишенях, учитывает дисперсию времени прихода нейтронов на мишень, определяемую их энергетическим спектром.

Функция отклика в данной работе определялась как распределение вероятности моментов времени (n,α)-реакций с ${}^6\text{Li}$, входящим в состав вещества детектора. Получаемое в результате моделирования с помощью MCNP эмпирическое распределение нормировано на полное число разыгранных историй. В данной работе исследовалась только ядерно-физическая часть функции отклика детектора и не принималась во внимание часть, связанная с работой оптического и электронного трактов спектрометра.

2. Результаты MCNP-моделирования

Для исследования влияния рассеяния нейтронов в воздухе (на пути от мишени до детектора) и в алюминиевой защитной пленке моделировались различные ситуации с включением и выключением рассеяния в воздухе, алюминиевой пленке и мишени. Поликристаллическая мишень цилиндрической формы была ориентирована по падающему на нее нейтронному пучку. Для поликристаллических образцов интенсивность рефлекса пропорциональна фактору повторяемости η [10]. В работе исследовалась Fe-мишень, для которой наиболее интенсивным является рефлекс [211], соответствующий максимальному значению $\eta = 24$ в области длин волн $\sim 1\text{Å}$. Выполненное моделирование показывает, что рассеяние в слое воздуха между мишенью и детектором не сказывается на ширине и амплитуде основной части функции отклика. Вклад рассеяния сводится к образованию небольшого пьедестала на уровне 10^{-3} к функции отклика. Пьедестал распределен по большому временному интервалу. В целом влияние воздуха приводит к уширению далекого крыла линии.

Изменение формы линии TOF-спектра для стандартной мишени (2×2 мм), обусловленное присутствием защитной алюминиевой фольги, учитывающее все факторы (воздух, конечные размеры мишени, рассеяние нейтронов в мишени), показано на рис. 2. Видно, что фактически никакого влияния фольга толщиной 0,1мм (фактическая толщина фольги) на TOF-спектр не оказывает, кроме образования вышеупомянутого пьедестала.

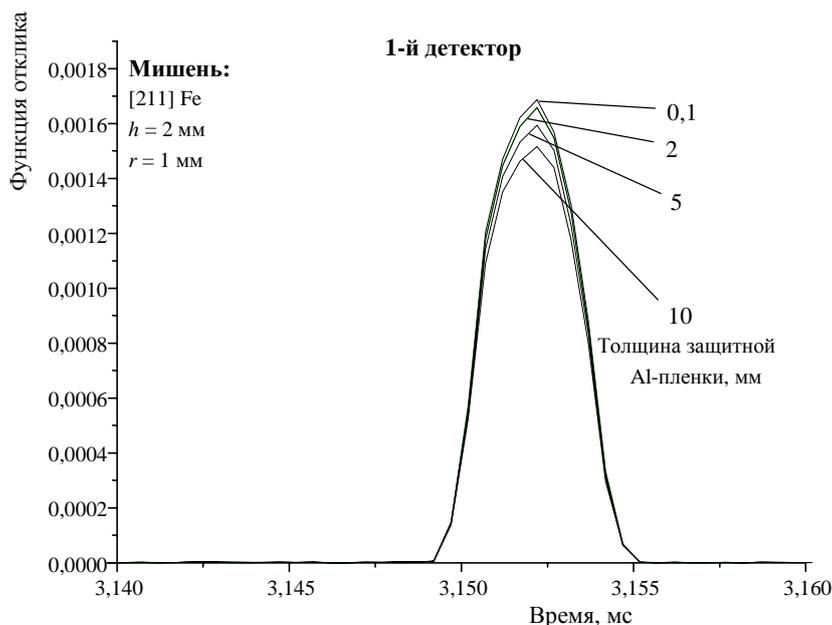


Рис. 2. Изменение амплитуды [211] – линии времяпролетного спектра для стандартной Fe-мишени из-за присутствия защитной фольги из алюминия

3. Моделирование точности юстировки детектора

Одной из задач настоящего моделирования являлось исследование влияния точности юстировки детектора на функцию отклика и, как следствие, на точность определения кристаллографических параметров. Начало системы координат помещено в центр мишени. Юстировка проводилась по углу вращения детектора вокруг вертикальной оси z вокруг фиксированной точки M (см. рис. 1, ось z перпендикулярна плоскости рисунка) с известными координатами и по сдвигу его вдоль нейтронного пучка (ось y). Эффекты неточности юстировки вдоль горизонтальной оси x являются эффектами второго порядка по отклонению, и ими можно пренебречь.

При заданной погрешности в установке детектора по углу или линейному сдвигу проводился расчет функции отклика с помощью программы MCNP. Затем по полученной функции отклика рассчитывались ее четыре первых момента $M_i, i=1, \dots, 4$, и стандартные статистические параметры [11] – дисперсия $\sigma^2 = M_2$, асимметрия A , эксцесс η :

$$M_i = \frac{1}{M_0} \sum_{k=N_{\min}}^{N_{\max}} (t_k)^i * f_k, \quad (3)$$

$$A = \frac{M_3}{M_2^{3/2}}, \quad \eta = \frac{M_4}{M_2^2} - 3,$$

где t_k – центр k -го временного бина, $k = (N_{\min}, N_{\max})$, f_k – значение функции отклика в k -м временном бине, M_0 – нормировочный множитель:

$$M_0 = \sum_{k=N_{\min}}^{N_{\max}} f_k .$$

Конкретный анализ влияния параметров юстировки на функцию отклика проводился для линии железа (кристаллографическая плоскость (211)). Поскольку для мишеней больших (несколько сантиметров) размеров основной вклад в полуширину функции отклика будет вносить протяженность мишени, то вклад неточности юстировки будет трудно выделить для мишеней большого размера. По этой причине ниже приведены результаты для мишеней малой протяженности (цилиндр радиусом $r = 1$ мм и высотой $h = 2$ мм, ориентированный по нейтральному пучку).

На рис. 3 приведены функции отклика для различных (от $0,5^\circ$ до 3°) значений отклонений углов юстировки относительно оси z . По этим функциям проводились расчеты первого, второго и четвертого моментов (рис. 4).

На рис. 5 приведен набор функций отклика при различных значениях ошибки юстировки вдоль оси y . По значениям этих функций вычислялись первые четыре момента и параметры функции отклика. Оказывается, что смещение детектора вдоль пучка на ± 5 см приводит к увеличению ширины функции отклика в 3 раза.

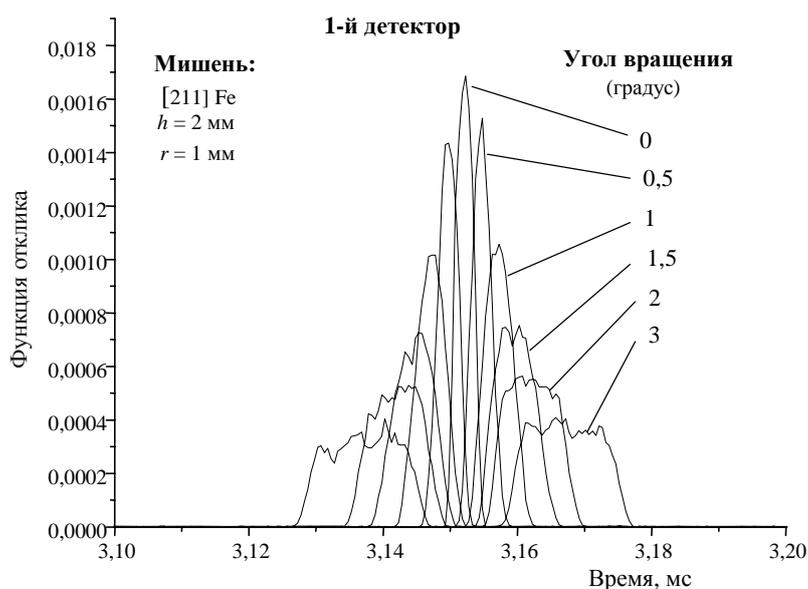


Рис. 3. Вид функции отклика при различных ошибках в углах юстировки (первая секция детектора). Непрономерованные линии слева соответствуют вращению детектора в противоположную сторону

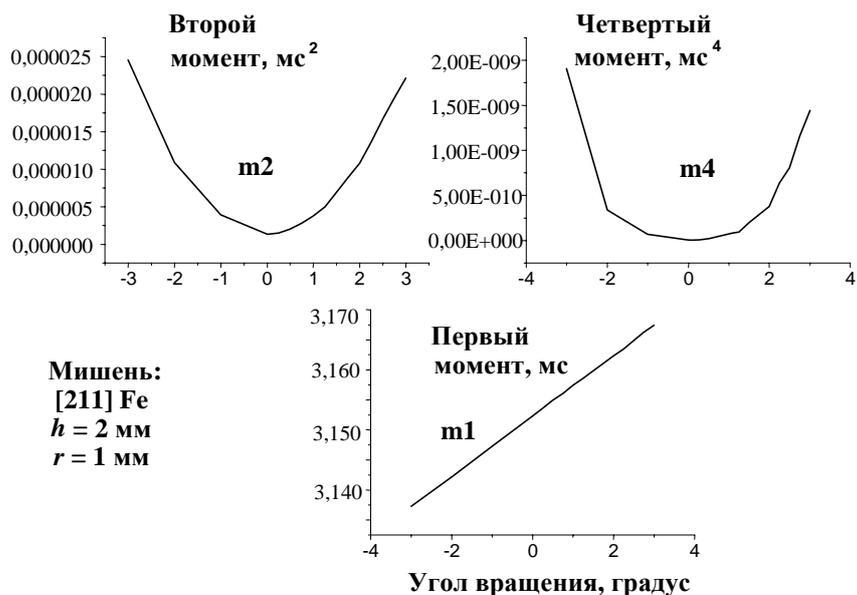


Рис. 4. Зависимость первого, второго и четвертого моментов функции отклика от точности угловой юстировки вокруг вертикальной оси z (спектры на рис. 3)

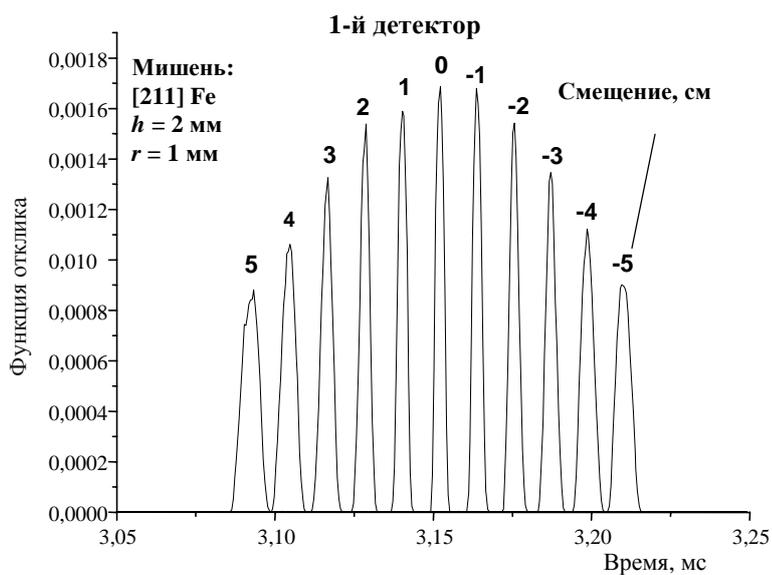


Рис. 5. Вид функции отклика при смещении детектора вдоль нейтронного пучка (ошибки юстировки по оси y)

4. Сравнение теоретических и экспериментальных ТОФ-спектров

Поскольку абсолютные значения положения и ориентации детектора для выполненных измерений [10] неизвестны, абсолютное сравнение теоретических и экспериментальных ТОФ-спектров не представляется возможным. Однако можно провести их относительное сравнение по зависимости ширины линии от угла поворота вокруг вертикальной оси z . Такое сравнение было выполнено для Fe-мишени размером $36,5 \times 5,0$ мм для отражения [211], наиболее интенсивного в ТОФ-спектре для этой мишени (рис. 6).

Из набора экспериментальных данных (подобных приведенным на рис. 6) была взята область, соответствующая наиболее интенсивному пику [211]. В предположении гауссовой формы измеряемых спектров методом нелинейного фитирования была найдена ориентационная зависимость положения пика и полуширины линии [211] при изменении угла вращения гониометра.

Ориентационная зависимость положения пика позволяет судить о величине систематической ошибки в определении межплоскостного расстояния за счет неточности юстировки. Наблюдается примерно линейная зависимость положения пика от угла вращения. В то же время второй момент определяет статистическую ошибку в определении межплоскостных расстояний. Полученная в результате моделирования угловая зависимость моментов и параметров функции отклика при вращении детектора вокруг вертикальной оси z приведена на рис. 7.

На рис. 8 приведена зависимость модельной и экспериментальной полуширины функции отклика от ошибки угловой юстировки. На эксперименте угловая юстировка осуществлялась с помощью гониометра посредством вращения детектора вокруг точки М, указанной на рис. 1. Характер ориентационной

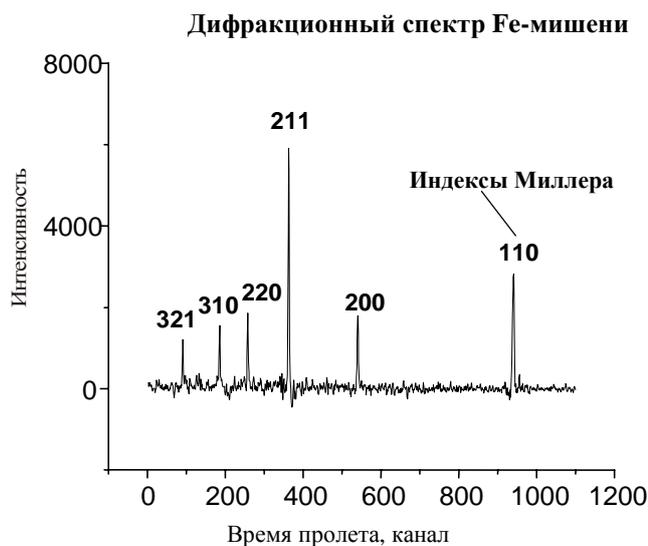


Рис. 6. Экспериментальный ТОФ-спектр нейтронного фурье-дифрактометра [12]. Цена деления канала фурье-дифрактометра составляет 4 мкс

зависимости полуширины линии при моделировании и в эксперименте одинаков. Экспериментальные и теоретические полуширины линий близки друг к другу, но теоретические спектры всегда уже экспериментальных. В минимуме ориентационной характеристики это отличие составляет 5%. Это небольшое отличие может быть отнесено за счет дополнительного вклада в ширину линии, обусловленного процессами в электронно-оптическом тракте спектрометра, которые здесь не рассматриваются.

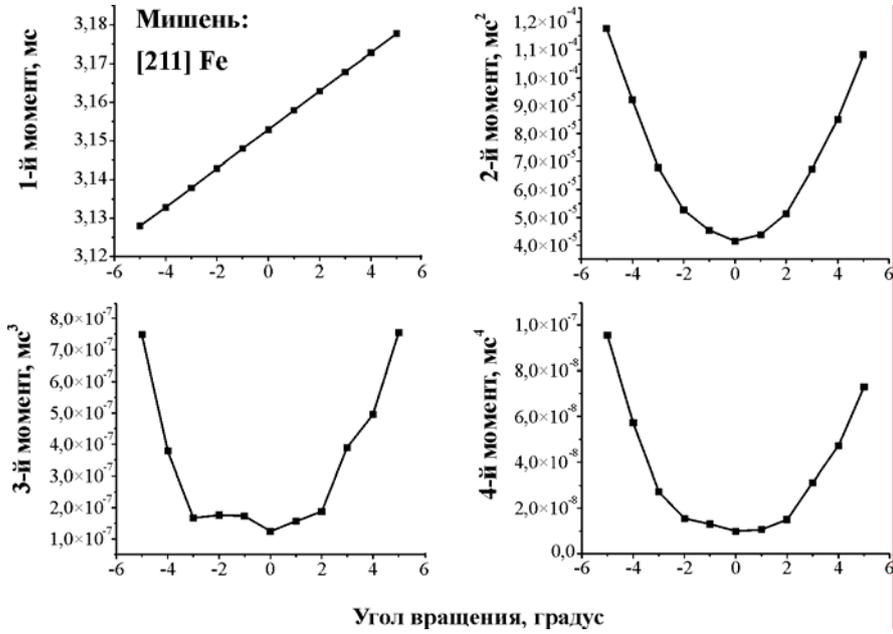


Рис. 7. Теоретическая зависимость первых четырех моментов функции отклика m_1, m_2, m_3, m_4 от точности юстировки детектора по углу вокруг вертикальной оси z для Fe-мишени размером $36,5 \times 5,0$ мм

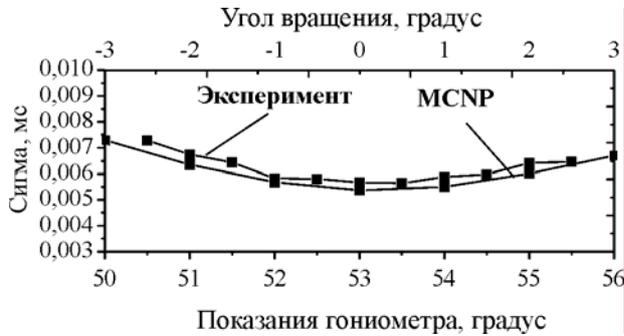


Рис. 8. Сравнение поведения полуширины экспериментального спектра и MCNP-функции отклика в зависимости от ошибки угловой юстировки для Fe-мишени размером $36,5 \times 5,0$ мм

В работе исследовано влияние точности юстировки детектора на параметры функции отклика с использованием методов Монте-Карло. Показано, что неточность в угловой юстировке по углу поворота вокруг вертикальной оси на 3–4 градуса приводит к уширению линии в 3–4 раза для мишени большого размера. Смещение детектора вдоль пучка на ± 5 см приводит к увеличению ширины функции отклика в 3–5 раз. Удовлетворительное согласие теоретического и экспериментального значений полуширины линий для Fe-мишени свидетельствует о достаточной корректности разработанной MCNP-модели дифракции нейтронов на поликристаллической мишени.

Разработанный метод может быть применен для решения и других задач, связанных с разработкой и изготовлением времяпролетного нейтронного детектора, в частности для исследования влияния конечных размеров мишени и детектора и процессов, происходящих в них, а также влияния конструкционных элементов на параметры нейтронного времяпролетного спектрометра.

Литература

1. Аксенов В. Л., Балагуров А. М. // УФН. 1996. Т. 166. С. 955–985.
2. Niismaki P. // Proc. IAEA Symp. Neutron Inelastic Scattering. Grenoble, 1972. P. 803.
3. Поуру Н., Niismaki P., Virjo A. // Nucl. Instr. Meth. 1975. Vol. 126. P. 421–433.
4. Аксенов В. П. и др. Нейтронный фурье-дифрактометр на реакторе ИБР-2. Дубна, 1991. Препринт ОИЯИ № РЗ – 91–172.
5. Hutchings M. T. // Nondestr. Test. Eval. 1990. Vol. 5. P. 395–413.
6. Carpenter J. M. // Nucl. Instr. Meth. 1967. Vol. 47. P. 179.
7. Holas A. // Nucleonika. 1968. Vol. 8. P. 871.
8. Александров Ю. А., Шаранов Э. И., Чер Л. Дифракционные методы в нейтронной физике. М, 1981.
9. Briesmeister J. F. (Ed.) MCNP- A General Monte-Carlo N-particle Transport, Version 4A, LA-12625, Los Alamos Natinal Laboratory, Los Alamos , New Mexico, November 1993.
10. Уиндзор К. Рассеяние нейтронов от импульсных источников. М., 1975.
11. Корн Г., Корн Е. Справочник по математике для научных работников и инженеров. М., 1974.
12. Бокучава Г. Д., Жук В. В., Кузьмин Е. С. Частное сообщение, 2000.

APPLICATION OF MONTE-CARLO METHODS IN PROBLEM OF ADJUSTMENT OF TIME-OF-FLIGHT NEUTRON SPECTROMETERS

G. D. Bokuchava, E. S. Kuzmin, I. S. Kuten, S. A. Kuten,
V. V. Zhuk, A. A. Khrutchinsky

The application of Monte-Carlo methods in problem of angular and spatial adjustment of time-of-flight neutron spectrometers is proposed. Results of numerical simulation are discussed.

ПРИМЕНЕНИЕ КОМПЬЮТЕРНОЙ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ ХРОМАТОГРАФИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ ЮНИХРОМ

**С. В. Черепица, С. В. Бычков, С. В. Гациха,
А. Н. Коваленко, А. Л. Мазаник, Н. М. Макоед**

Система ЮниХром представляет собой комплекс аппаратного и программного обеспечения, предназначенный для автоматизации хроматографических исследований, разработки хроматографических методик, проведения серийных и отдельных исследовательских анализов любой сложности [1, 2].

Название ЮниХром происходит от английского Universal Chromatography. Разработчики системы ЮниХром в слово «универсальная» вкладывают следующий смысл:

- работа с любым отечественным и зарубежным хроматографом;
- универсализация пользовательского интерфейса программного обеспечения для того, чтобы разные приборы выглядели для аналитика одинаково;
- возможность работы как с газохроматографическими, так и жидкостно-хроматографическими приборами;
- возможность выполнения любых цепочек сложных измерений, какие только могут присутствовать в отечественных ГОСТах и зарубежных стандартах на методики выполнения хроматографических измерений;
- универсальное математическое обеспечение для обсчета измеренных данных;
- спектральная арифметика;
- визуальное программирование хроматографических методик для автоматической работы системы ЮниХром с каждым конкретным хроматографом, что необходимо в случае серийных анализов на производстве;
- автоматический режим работы системы ЮниХром. Особенностью его является то, что для каждого конкретного случая алгоритм настраивается и может быть всегда изменен. Кроме этого, для пользователя всегда существует возможность вмешаться в запрограммированную методику в момент ее выполнения, изменить ее ход или откорректировать обнаруженные системой ЮниХром пики и любые другие характеристики спектра. Спектром в системе ЮниХром является измеренная хроматограмма со всеми ее атрибутами;
- взаимодействие с такими приложениями, как Microsoft® Word, Excel, Access, Internet Explorer и другие, для создания отчетов (взаимодействие с любым ПО, поддерживающим OLE Automation).

На сегодняшний день программное обеспечение системы ЮниХром работает под Win32™ операционными системами фирмы Microsoft®: Windows 95, 98 и Windows NT 4.0, Windows 2000.

Аппаратное обеспечение

Система ЮниХром является конструктивно не зависимой от источника сигнала хроматографа системой регистрации, обработки и хранения хромато-

графической информации и включает в себя два функциональных модуля: входной интегрирующий преобразователь аналогового сигнала в цифровой код и персональный компьютер с программным обеспечением системы, предоставляющим различные сервисные функции для регистрации и обработки хроматографических данных.

Аналогово-цифровой преобразователь (АЦП) системы ЮниХром выполнен в виде автономного блока. Питание осуществляется от стандартной сети переменного напряжения 220 В. Блок имеет два независимых входа. Каждый вход может принадлежать к одному из двух следующих типов. Вход первого типа является потенциальным с входным сопротивлением 50 Ком. Высокий динамический диапазон регистрации входного напряжения от -3 до $+3$ В с шагом квантования 20 нВ и уровнем приведенных шумов 0,3 мкВ позволяет не только регистрировать сигнал с выхода базового усилителя, входящего в комплект с хроматографом, но и осуществлять подключение АЦП непосредственно к электрическому выходу детектора, в данном случае детектора по теплопроводности. Вход второго типа является токовым и обеспечивает измерение входного сигнала от $-0,25$ до $+0,25$ мкА с шагом квантования 2 фА при уровне приведенных шумов 5 фА. Это достигнуто благодаря имеющемуся встроенному в блоке АЦП прецизионному высокоточному усилителю малых токов. Столь низкий уровень приведенного ко входу шума и высокий динамический диапазон регистрации входного тока позволяют регистрировать сигнал как с выхода базового усилителя, входящего в комплект вместе с хроматографом, так и осуществлять подключение АЦП непосредственно к электрическому выходу ионизационного детектора, будь то пламенно-ионизационный детектор (ПИД), детектор электронного захвата (ДЭЗ), термоионный детектор (ТИД) или пламенно-фотометрический детектор (ПФД).

Подключение непосредственно к детектору хроматографа позволяет отказаться от усилителей малых токов, например ИМТ-05 или БИД-36, БИД-39, БИД-45. Высокий динамический диапазон регистрации входного тока обеспечивает регистрацию величин концентраций компонентов смеси от 100 до 0,00001 % без ручного переключения диапазонов, т. е. без вмешательства оператора. Как следствие, появляется возможность выполнять хроматографические измерения с использованием метода внутренней нормализации для количественного анализа смесей с большим диапазоном величин концентраций исследуемых компонентов. Насколько известно из публикаций, аналогов такого технического решения нет.

При биполярном режиме работы АЦП проводить измерения можно без предварительной установки нуля и полярности сигнала с помощью ручек регулировки на подключенном хроматографе.

Связь блоков АЦП нового устройства с компьютером осуществляется по стандартной линии RS-232 через последовательный порт компьютера. В блоке АЦП линия RS-232 преобразуется в линию RS-485. К одной линии RS-485 может быть подключено до 16 устройств, которые образуют так называемую «лабораторную сеть» устройств – LabNet. Схематически конфигурация построения такой сети представлена на рис. 1.

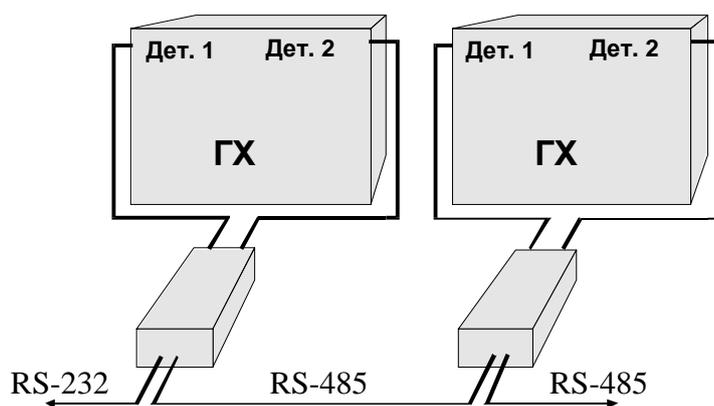


Рис. 1. Конфигурация построения лабораторной сети устройств LabNet

Именно такое сетевое решение соединения нескольких блоков АЦП, разнесенных на расстояние более 30 м, позволило подключить по 12 хроматографов к одному персональному компьютеру в контрольных лабораториях «Циклогексанон-1», «Циклогексанон-2» и «Метанол» Гродненского ПО «Азот», ЦОТК Могилевского ПО «Химволокно», ОАО «Невинномысский Азот», ОАО «Новгородский Азот» (АКРОН) и ЦЗЛ Новополоцкого ПО «Нафтан».

Программное обеспечение

Пакет программного обеспечения системы ЮниХром состоит из основного исполняемого модуля Uwin32 и драйверов поддержки различных типов хроматографического оборудования. Модуль Uwin32 является стандартным 32-разрядным приложением для Windows 95/98/Me/NT/2000. Это означает, что вся работа с программой и ее компонентами сводится к стандартным для Windows действиям по работе с окнами, файлами, другими программами и устройствами.

Идеология программы ЮниХром проста и состоит в следующем. Каждому измерению (анализу) отводится свое окно. Через это окно происходит управление процессом измерения, отображается хроматограмма и вся дополнительная информация о ней. Многооконный режим работы позволил пойти дальше. Стало возможным помимо окон ведущихся измерений на рабочем столе основной программы открывать окна для обработки измеренных и сохраненных ранее хроматограмм. Таким образом, система ЮниХром позволяет одновременно вести измерения и обработку сохраненных ранее хроматограмм в разделенных окнах. Общее число открываемых окон при этом ограничивается лишь памятью компьютера. Для управления столь большим количеством окон основная программа имеет соответствующие элементы управления на своем рабочем столе. Характерный вид рабочего окна системы ЮниХром представлен на рис. 2.

В процессе создания ПО ЮниХром разработчики учитывали многочисленные пожелания пользователей системы, работавших с так называемыми бета-версиями программного обеспечения. В результате в словаре для системы ЮниХром появилось такое основополагающее понятие, как **Окно спектра**, или

просто **Спектр**. Данная структура представляет собой окно, содержащее набор хроматограмм с соответствующими им пиками, общие свойства хроматограмм (название, длительность измерения, измерительный канал и другие параметры, вводимые пользователями), калибровочные данные и сценарий обработки хроматограмм. Благодаря структуре **Спектр** удалось реализовать возможность выполнения любых цепочек сложных измерений, спектральную арифметику, визуальное программирование хроматографических методик для автоматической работы системы ЮниХром. Оказалось возможным выполнять расчеты не только методом внутренней нормализации и внутреннего стандарта, но и методом внешнего стандарта (абсолютная калибровка). Наличие в спектре более одной хроматограммы позволило рассматривать эту структуру как универсальную библиотеку хроматографических пиков, и, соответственно, в системе ЮниХром появилась возможность идентификации пиков по таким гибким библиотекам. Именно наличие структуры **Спектр** позволило реализовать выполнение в автоматическом режиме методики газохроматографического детального углеводородного анализа и определения параметров автомобильных бензинов [3].

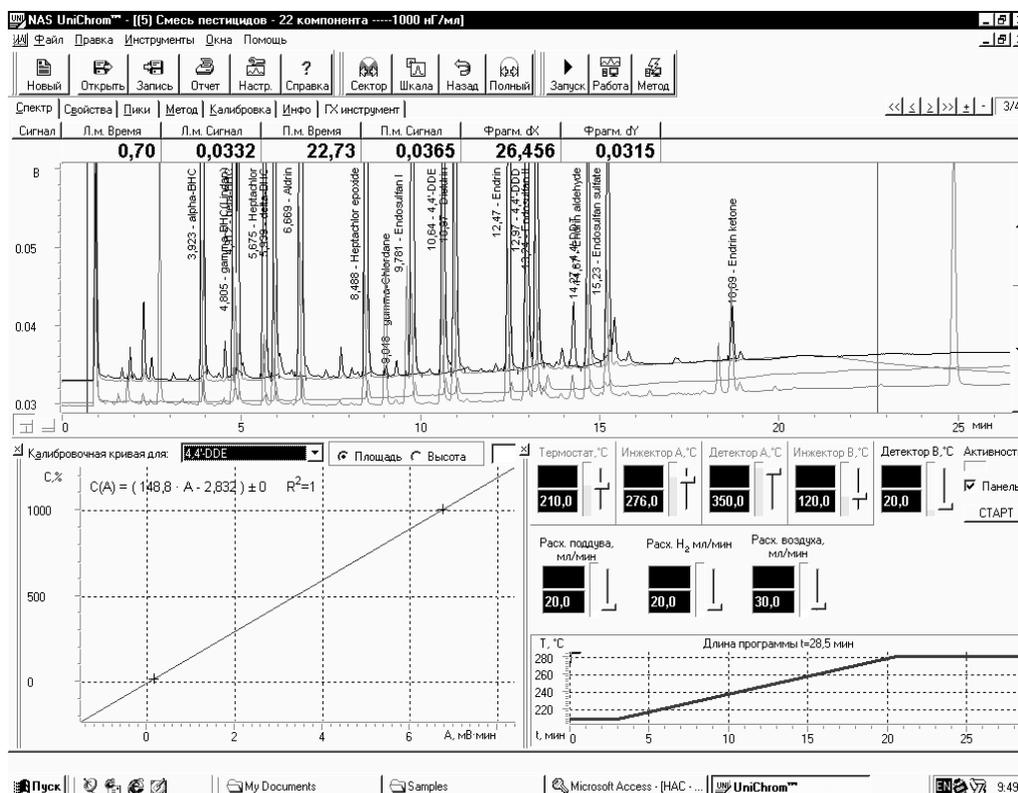


Рис. 2. Характерный вид рабочего окна системы ЮниХром

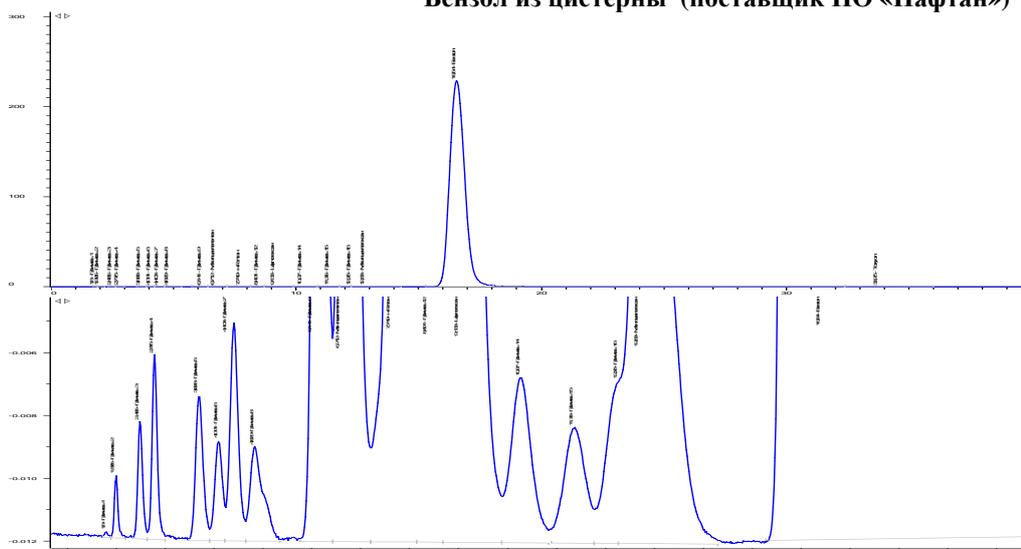
Естественным желанием разработчиков было предоставить пользователю возможности управлять основными параметрами измерительного прибора непосредственно от компьютера, не выходя из системы ЮниХром. Например, задавать температурные параметры инжектора, термостата колонок, переходной камеры, детектора, контролировать расход газов и давления в газовых магистралях. Управление установками хроматографа производится в едином стиле для различных типов приборов, что позволяет унифицировать пользовательский интерфейс. В настоящее время система ЮниХром укомплектована драйверами, позволяющими управлять работой таких распространенных приборов, как HP4890, HP5890, HP6890, Shimadzu GC17A, Кристалл-2000М, Кристаллюкс-4000 и Цвет-800.

Методики выполнения хроматографических измерений с применением системы ЮниХром

1. Количественное определение содержания примесей с использованием основного компонента (растворителя) в качестве внутреннего стандарта. Такая ситуация возникает всякий раз, когда необходимо выполнять количественные измерения содержания примесей в основном веществе. Доля основного вещества может составлять 95 % и более, в то время как содержание отдельных примесей необходимо контролировать на уровне 0,00001 % и менее. Вводить добавку в виде внутреннего стандарта не всегда представляется возможным. Часто бывает, что количество примесей достаточно большое и возможности колонки не позволяют отделить вводимую добавку от искомым примесей. К тому же процесс введения добавки часто сопряжен со значительным увеличением суммарной погрешности измерений. В качестве примера реализации измерений содержания примесей в основном веществе методом внутренней нормализации можно привести контрольные лаборатории ЦОТК Гродненского ПО «Азот» и ОАО «Невинномысский Азот», а также газокаталитическую лабораторию ЦЗЛ ПО «Нафтан». Из 19 регламентных методик выполнения хроматографических измерений 12 непосредственно связаны с определением чистоты основного вещества, будь то входное сырье или готовая товарная продукция. Проведение хроматографического анализа с измерением концентраций в динамическом диапазоне более 7 десятичных порядков требовало неотрывного присутствия операторов для своевременного переключения диапазонов чувствительности приборов. Для автоматизации измерений была выбрана система ЮниХром. Входы блоков АЦП системы были подключены непосредственно к ПИД имеющихся хроматографов: 3700, Цвет-100 и Цвет-500. Типичная хроматограмма регламентных измерений содержания примесей в исходном сырье бензоле приведена на рис. 3.

Установка и ввод в промышленную эксплуатацию систем ЮниХром в контрольных лабораториях служб контроля качества крупнейших химических предприятий Беларуси и России позволили перевести все хроматографические измерения полностью в автоматический режим.

Бензол из цистерны (поставщик ПО «Нафтан»)



Имя пика	Время выхода, мин	Площадь, мВ·мин	Концентрация, об. %
Примесь 1	1,800	0,01692	0,00001
Примесь 2	1,995	0,17258	0,00011
Примесь 3	2,485	0,42850	0,00026
Примесь 4	2,776	0,73053	0,00045
Примесь 5	3,688	0,84110	0,00052
Примесь 6	4,091	0,58988	0,00036
Примесь 7	4,403	1,38468	0,00086
Примесь 8	4,829	0,94460	0,00058
Примесь 9	6,141	11,54775	0,00713
Метилциклопентан	6,712	24,76129	0,01529
н-Гептан	7,749	36,76245	0,02271
Примесь 12	8,491	8,87329	0,00548
Циклогексан	9,133	30,99220	0,01914
Примесь 14	10,267	2,60147	0,00161
Примесь 15	11,363	1,87776	0,00116
Примесь 16	12,261	1,50891	0,00093
Метилциклогексан	12,827	21,69016	0,01340
Бензол	16,536	161754,05000	99,90352
Толуол	33,747	10,49359	0,00648

Рис. 3. Пример регистрации хроматограммы с динамическим диапазоном концентраций компонентов более 10^7 порядков.

Хроматограф Цвет-100, система ЮниХром, регистрация прямо с ПИД

2. Методика газохроматографического определения этилового спирта в жидких биологических средах организма. Уникальные возможности системы ЮниХром по автоматическому созданию сложных отчетов средствами Microsoft® Word™ и Microsoft® Excel™ можно наглядно продемонстрировать на примере выполнения методики № МН 1329-2000 [4] хроматографического определения остаточного содержания этилового спирта в крови, моче и слюне. Перед началом измерений лаборант вносит в соответствующие поля раздела «Свойства» формальные данные из направления на проведение анализа: ФИО гражданина(ки), год рождения, кто направил, дата и время и т. д. После выполнения хроматографического анализа программа по заранее созданному шаблону ToxEtanol.xlt на основании выполненного измерения и введенных формальных данных подготавливает итоговый отчет и выдает его в формате Excel.

Распечатанный протокол полностью соответствует утвержденной официальной форме химико-токсикологического анализа. Одновременно данные итогового документа заносятся в базу архива с помощью технологии, названной «расширения ЮниХром». С помощью модулей расширения можно реализовать связь практически с любой информационной системой масштаба подразделения или предприятия. Система управления базой данных всех выполненных анализов написана на Borland® Delphi™ 4.0 и реализована в виде самостоятельного приложения программы-редактора «Журнал учета выполненных анализов химико-токсикологической лаборатории».

За время эксплуатации систем в химико-токсикологических лабораториях Минского городского и Гродненского областного наркодиспансеров, а также Управления Белорусской государственной службы судмедэкспертизы по Витебску и Витебской области выполнено более 200 000 официальных анализов.

3. Методика газохроматографического определения параметров автомобильных бензинов. Возможность программного обеспечения системы ЮниХром проводить идентификацию сложных хроматограмм, содержащих несколько сотен пиков, в том числе и не полностью разрешенных, позволила автоматизировать хроматографические измерения детального углеводородного анализа и показателей качества бензинов и бензиновых фракций. По результатам только одного газохроматографического измерения образца бензина по МВИ № МН 998-99 [3, 5, 6], длящегося порядка 40 мин, можно определить в комплексе такие важные его характеристики, как:

- детальный углеводородный и групповой состав (соответствует ASTM D5134);
- содержание ароматических соединений (соответствует ГОСТ 6994 и ASTM D5580);
- содержание непредельных углеводородов (соответствует ГОСТ 8997 и ГОСТ 2070);
- фракционный состав (соответствует ГОСТ 2177);
- октановое число по исследовательскому методу (соответствует ГОСТ 8226 и ASTM D2699);
- октановое число по моторному методу (соответствует ГОСТ 511 и ASTM D2700);
- давление насыщенных паров (соответствует ГОСТ 1756 и ASTM D2889);
- плотность (соответствует ГОСТ 3900 и ASTM D4052).

Приведем краткую форму протокола анализа бензина с диаграммой фрикционного состава, полученного с помощью системы ЮниХром.

Протокол анализа бензина № 18

Файл: C:\Unichrom\DB – Petroleum Products\Column HP-1 19091Z-115\Товарный бензин. \$\$\$

Спектр: ТОВАРНЫЙ БЕНЗИН (DATE: 21.10.98. TIME: 15.43)

Хроматограмма: АЗС-IV г. Минск: Новополоцкий НПЗ RON 82,0 MON 77,0

Индивидуальный состав (обработано 322 пика)

№	Название	t'	I лин	I лог	об. %	масс. %	мол. %	г/л	мол/л
1	Этан	0,05	200,00	200,00	0,023	0,017	0,054	0,130	0,004
2	Пропан	0,16	300,00	300,00	0,340	0,266	0,562	1,969	0,045
3	2-метилпропан	0,32	354,19	366,44	0,776	0,584	0,937	4,325	0,074
4	1-бутен	0,41	385,20	390,40	0,020	0,016	0,027	0,118	0,002
5	н-бутан	0,46	400,00	400,00	3,297	2,599	4,173	19,265	0,331
6	Транс-2-бутен	0,51	406,52	410,60	0,012	0,010	0,017	0,075	0,001
7	2,2-диметилпропан	0,53	409,19	414,63	0,024	0,020	0,025	0,146	0,002
8	Цис-2-бутен	0,59	416,56	425,01	0,013	0,011	0,018	0,079	0,001
9	3-метил-1-бутен	0,81	445,19	457,43	0,008	0,006	0,009	0,048	0,001
10	Циклобутан	0,85	450,11	462,07	0,000	0,000	0,000	0,002	0,000
11	2-метилбутан	0,96	464,74	474,76	7,571	6,381	8,253	47,296	0,656
12	1-пентен	1,11	483,76	489,15	0,018	0,016	0,021	0,115	0,002
13	2-метил-1-бутен	1,18	493,27	495,65	0,033	0,029	0,039	0,216	0,003
14	н-пентан	1,24	500,00	500,00	8,027	6,834	8,839	50,652	0,702
15	Транс-2-пентен	1,33	504,60	507,51	0,040	0,036	0,047	0,263	0,004
16	Цис-2-пентен	1,44	509,72	515,29	0,018	0,016	0,022	0,122	0,002
		
320	н-пентадекан	48,26	1500,00	1500,00	0,006	0,007	0,003	0,049	0,000
321	1-гексадекен	50,64	1590,71	1590,93	0,005	0,005	0,002	0,040	0,000
322	н-гексадекан	50,88	1600,00	1600,00	0,008	0,009	0,004	0,065	0,000
Всего:					100,000	100,000	100,000	741,178	7,943

Групповой состав

Группа	об. %	масс. %	мол. %	г/л	мол/л
Парафины	24,190	21,227	24,734	157,333	1,965
Изопарафины	32,484	29,333	30,100	217,411	2,391
Ароматика	32,548	38,412	34,363	284,700	2,729
Нафтены	9,253	9,570	9,504	70,933	0,755
Олефины	0,992	0,931	0,963	6,897	0,076
Оксиданты	0,003	0,003	0,004	0,024	0,000
Неизвестные	0,530	0,524	0,332	3,880	0,026

Показатели качества

Количество вещества, мол/л:	7,94
Содержание кислорода, масс. %:	7,16E-04
Содержание водорода, масс. %:	1,35E+01
Плотность, г/л:	741,18
Октановое число по моторному методу:	77,10
Октановое число по исследовательскому методу:	82,38
Давление насыщенных паров (по фракциям): (449,66 мм рт. ст.)	59,949 кПа
Давление насыщенных паров (по индивидуальным компонентам):	62,602 кПа (469,56 мм рт. ст.)
Фракционный состав по ГОСТ 2177А	% отгона н.к. 10 50 90 к.к.
	Т отгона 40,19 59,11 100,26 155,96 190,46

Сравнительный анализ параметров бензинов, измеренных газохроматографическим методом в исследовательских лабораториях трех организаций: Государственный экспертно-криминалистический центр (ГЭКЦ) МВД РБ, НИИ ЯП БГУ и ЦЗЛ Мозырского НПЗ, показал, что воспроизводимость параметров, рассчитанных по хроматограмме, превосходит воспроизводимость соответствующих методов по ГОСТам. В настоящее время газохроматографическая методика определения детального углеводородного состава и основных параметров бензинов и бензиновых фракций внедрена и успешно эксплуатируется в ЦЗЛ Мозырского НПЗ, в государственном экспертно-криминалистическом центре МВД РБ, в лаборатории аналитических исследований НИИ ЯП БГУ. Стабильность воспроизводимости результатов позволяет четко выявлять несоответствие продуктов ГСМ их сертификатам, когда имеются факты фальсификации смешения и разбавления ГСМ.

Пользователями данной методики анализа основных параметров бензинов могут быть любые производители, поставщики, переработчики или получатели нефтепродуктов или нефтяных фракций, а также контрольные лаборатории и организации по исследованию нефти и нефтепродуктов.

В настоящий момент лаборатория аналитических исследований НИИ ЯП БГУ аккредитована на независимость и техническую компетентность для проведения испытаний автомобильных бензинов. Аттестат аккредитации ВУ/112.02.0.1.0384.

4. Методика выполнения измерений компонентного состава, определение теплоты сгорания, относительной плотности и числа Воббе природного горючего газа. На сегодняшний день теплотворная способность природного горючего газа измеряется двумя методами. Первый метод основан на калориметрии, а второй метод – на определении компонентного состава газа с последующим расчетом его теплоты сгорания. При этом калориметрию применяли и применяют теплоэнергетики, т. е. потребители газа, а поставщики газа – газодобывающие и газотранспортирующие предприятия – определяют состав газа и по полученным данным о компонентном составе рассчитывают такие его параметры, как теплота сгорания, плотность, относительная плотность и число Воббе.

В настоящее время на Западе результаты определения теплоты сгорания, полученные двумя этими методами, согласуются в пределах 0,1 %. В России и Беларуси расхождения нередко достигают 1–1,5 %, что приводит к конфликтным ситуациям при взаимозачетах за газ. Исследование причин расхождений показало, что они связаны с рядом моментов, среди которых: класс точности применяемых приборов и настройка их на соответствующие границы (поставщик завышает, а потребитель занижает свой результат в пределах нормированной погрешности); некорректная градуировка хроматографа и, как правило, неграмотная интерпретация результатов; отсутствие или несоблюдение методики выполнения измерений, разработанной для данного типа хроматографа; недостоверность и непредставительность отобранной для анализа пробы газа; сравнение результатов, полученных на приборах поставщика и потребителя, разнесенных на значительное расстояние; высокая влажность газа. В целях решения указанных выше противоречий по заданию ГП «Белтрансгаз» была

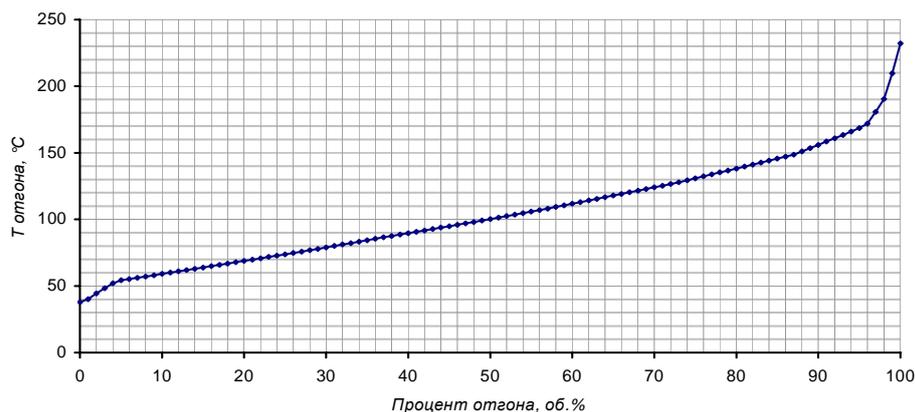


Рис. 4. Кривая дистилляции, полученная по данным детального углеводородного анализа разработана и аттестована в Госстандарте методика выполнения измерений компонентного состава, определения теплоты сгорания, относительной плотности и числа Воббе природного горючего газа № МН 1140-99 [7]. Погрешность определения теплотворной способности газа не превышает 0,2 % (см. рис. 4). Данная методика внедрена и успешно используется в центральной химической лаборатории ГП «Белтрансгаз», в ЦОТК Гродненского ПО «Азот», ОАО «Невинномысский Азот» и ОАО «Новгородский Азот» (АКРОН).

Метрологическое обеспечение системы

Система ЮниХром сертифицирована и занесена в Государственный реестр средств измерений Республики Беларусь № РБ 03 09 7202 98 и № 19675-00 в Госреестр Российской Федерации.

В соответствии с техническими условиями ТУ РБ 14597800.001-98 необходимо один раз в год проводить метрологическую поверку системы ЮниХром. Ее проводят в соответствии с методикой поверки МП 330-97.

В качестве технических средств поверки системы используется генератор тестовых сигналов специальной формы ГТС-1. Прибор ГТС-1 выдает прецизионные гистограммы тока и напряжения определенной, задаваемой по программе, формы и амплитуды в широком динамическом диапазоне. Получаемые гистограммы имитируют реальные хроматограммы.

Хроматографический комплекс в комплекте с системой ЮниХром согласно ГОСТу 26703-93 и ГОСТу 8.485 может быть поверен в соответствии с разделом «Оперативный контроль погрешности», используемой МВИ.

В настоящее время в контрольных и исследовательских лабораториях различных организаций и предприятий Республики Беларусь и Российской Федерации установлено и успешно эксплуатируется более 200 систем ЮниХром. Применение данной системы при проведении хроматографических исследований

позволяет существенно увеличить метрологические параметры имеющегося парка аналитического оборудования, автоматизировать процесс измерений, существенно ускорить обработку экспериментальных данных, подготовку итоговой отчетной документации, передачу аналитических данных в информационную систему предприятия.

Литература

1. ТУ РБ 14597800.001-98. Система регистрации, хранения и обработки спектрометрической информации ЮНИХРОМ.
2. *Соболев В. С.* // Приборы и системы управления. 1998, № 1. С. 55–63.
3. МВИ № МН 998-99. Методика газохроматографического определения параметров автомобильных бензинов.
4. МВИ № МН 1329-2000. Методика газохроматографического определения этилового спирта в жидких биологических средах организма.
5. *Черепица С. В., Бычков С. М., Гациха С. В. и др.* // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2000. Т. 66, № 2. С. 58–66.
6. *Charapitsa S. V., Bychkov S. M., Kavalenka A. N. et al.* // Proc. Intern. Conf., Pittsburg, March 13–17 2000. P. 1621.
7. МВИ № МН 1140-99. Методика выполнения измерений компонентного состава, определение теплоты сгорания, относительной плотности и числа Воббе природного горючего газа.

APPLICATION OF THE CHROMATOGRAPHIC DATA SYSTEM UNICHROM

**S. V. Charapitsa, S. M. Bychkov, S. V. Gatsiha,
A. N. Kavalenka, A. L. Mazanik, N. M. Makaed**

The chromatographic data system UniChrom is the software and hardware complex intended for the full automation of chromatographic measurements. This product is positioned for serial and unique analysis of any kind of complexity. System is suitable for both industrial and research laboratory.

Using UniChrom in laboratory can give a new life to existing equipment and tie it together with new one. UniChrom protects investments in analytical equipment and unifies instrumentation control for both legacy and new devices.

UniChrom system allows connection up to 16 chromatographs to one computer and simultaneous work with them. Each chromatographic device can use 2 channels (total 32 channels).

UniChrom directly controls of HP-4890, HP-5890, HP-6890 (Hewlett Packard), GC-17A (Shimadzu), Crystall-2000M (Russia) and «Tswett-800» (Russia).

For automation of chromatographic instruments that have only analog outputs it was developed an ADC Lnet (analog to digital converters laboratory network). ADC Lnet blocks allow connection up to 32 measuring channels through only one standard PC serial port RS-232. Lnet devices are connected in RS-485 chain. Network uses bus topology and proprietary protocol called Lnet. Segments can be up to 50m long. Conversion of RS-232 to RS-485 is made by one of ADC block. Lnet blocks use well-known chip AD7710 (Analog Devices) that provides 20–24 bit resolution depending on sampling rate.

The ADC Lnet blocks can be connected directly to the detector of a chromatograph, without any additional amplifiers. This solution makes possible shorten analog cable length to less than 1m, and connect to computer chromatographs of *almost any type*.

ADC Lnet have built-in low-current amplifiers. Noise level for input current and voltage is $1 \cdot 10^{-14}$ A and 0.3 mV, respectively. Low current channel can be connected directly to the ionization detectors (flame ionization detector – FID, electron capture detector – ECD, nitrogen phosphorus detector – NPD). Registration of the components concentrates in range of 0.00001 – 100 % takes place without a operator intervention. The real dynamical range of a measurement is 10,000,000.

The automatic report generation uses capabilities of MS Word, MS Excel, MS Access and other OLE Automation capable applications.

UniChrom data system allows development of complex methods for chromatogram data processing. For example, Detailed Hydrocarbon Analysis (DHA) and prediction of the basic parameters for petroleum fractions are successfully implemented in Novopolotsk and Mozyr Oil Refineries (Belarus). Automatic report generation with an automatic calculation is made using MS Office templates.

State Metrology Committees of Belarus and Russia certify the UniChrom system. More than 250 of such systems are exploited in the enterprises of Belarus and Russia.

ИССЛЕДОВАНИЯ И РАЗРАБОТКИ В ОБЛАСТИ МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ВОЛНОВОЙ ДИАГНОСТИКИ МАТЕРИАЛОВ И СРЕД

В. И. Иванов, А. Н. Лазарчик

Основной направленностью научно-технической деятельности лаборатории физики быстропротекающих процессов НИИ ЯП является разработка методов и систем многопараметрической диагностики материалов и сред, основанных на использовании оптического, ультразвукового и радиоволнового излучений.

В первые годы существования лаборатории доминирующей задачей являлась разработка методов и систем дистанционной лазерной диагностики стохастических рассеивающих поверхностей и сред для решения ряда прикладных специфических задач. На основе имеющегося задела в области дистанционной лазерной диагностики [1–4] с учетом специфики решаемых задач и их применения выполнен комплекс работ для дистанционного определения оптических характеристик атмосферы и океана, поверхностного волнения, дистанционной спектрометрии сверхмалых акустических колебаний и отражающих характеристик шероховатых поверхностей [5–23]. Предложены новые способы и разработаны системы измерения оптических характеристик рассеивающих сред на комбинированных трассах «атмосфера – гидросфера» [5–7], подстилающей поверхности [8]; лазерно-локационного определения объемных характеристик объектов, панорамной лазерной диагностики мелкомасштабного поверхностного волнения для дистанционного обнаружения подводных течений, взрывов и движущихся заглубленных объектов по их поверхностным проявлениям [9–19]; частотной лазерной спекл-спектрометрии сверхмалых акустических колебаний шероховатых поверхностей для дистанционной вибродиагностики объектов, а также их классификации на основе анализа собственных акустических колебаний и ряда других физических параметров [8, 20–23].

В постчернобыльский период, характеризующийся достаточно высоким уровнем загрязнения окружающей среды радионуклидами и химическими веществами техногенной природы, направленность деятельности лаборатории существенно изменилась.

С момента чернобыльской катастрофы большая часть населения республики хронически испытывает достаточно сильное мутагенное давление сочетательного типа, включая радиационные и токсические воздействия. Данный фактор может оказать критическое влияние на генетический статус человеческой популяции в Республике Беларусь, например в форме резкого увеличения частоты и тяжести генетических и онкологических заболеваний. Поэтому важной задачей является минимизация дополнительных лучевых нагрузок на организм человека, в частности, обусловленных рентгеновскими методами диагностики в медицинской практике. В этом плане совместно с 29-й поликлиникой г. Минска, РНПЦ «Кардиология» и предприятием «КОНФОРМ» лабораторией разработаны и созданы опытные образцы приборов, основанные на энергетической и много-частотной ультразвуковой доплеровской локации тканей и сосудов человека, позволяющие минимизировать, а в ряде случаев полностью исключить рентгенов-

ское излучение при диагностике заболеваний лобных и гайморовых пазух, диагностике мозгового кровообращения, коронарографии.

В условиях высокого мутагенного риска в постчернобыльский период чрезвычайно важной задачей является оперативная оценка и прогноз генетических изменений у населения республики. Вместе с тем объективная оценка генетического здоровья нации может быть получена только при осуществлении широкомасштабного постоянно действующего мониторинга поглощенных биологических доз радиоактивного излучения организмом человека с выявлением генетических изменений.

Оптимальным методом оценки генетического дрейфа и реконструкции поглощенных биологических доз является цитогенетический метод, основанный на анализе структурных и числовых aberrаций хромосом человека. Однако в связи с необходимостью анализа и систематизации информации большого количества цитогенетических препаратов и трудоемкостью их анализа, особенно в случае оценки числовых aberrаций, реализация цитогенетического метода в рамках широкомасштабного генетического мониторинга требует создания сети диагностических лабораторий, оснащенных 10–15 специальными высокопроизводительными компьютеризированными системами анализа хромосом.

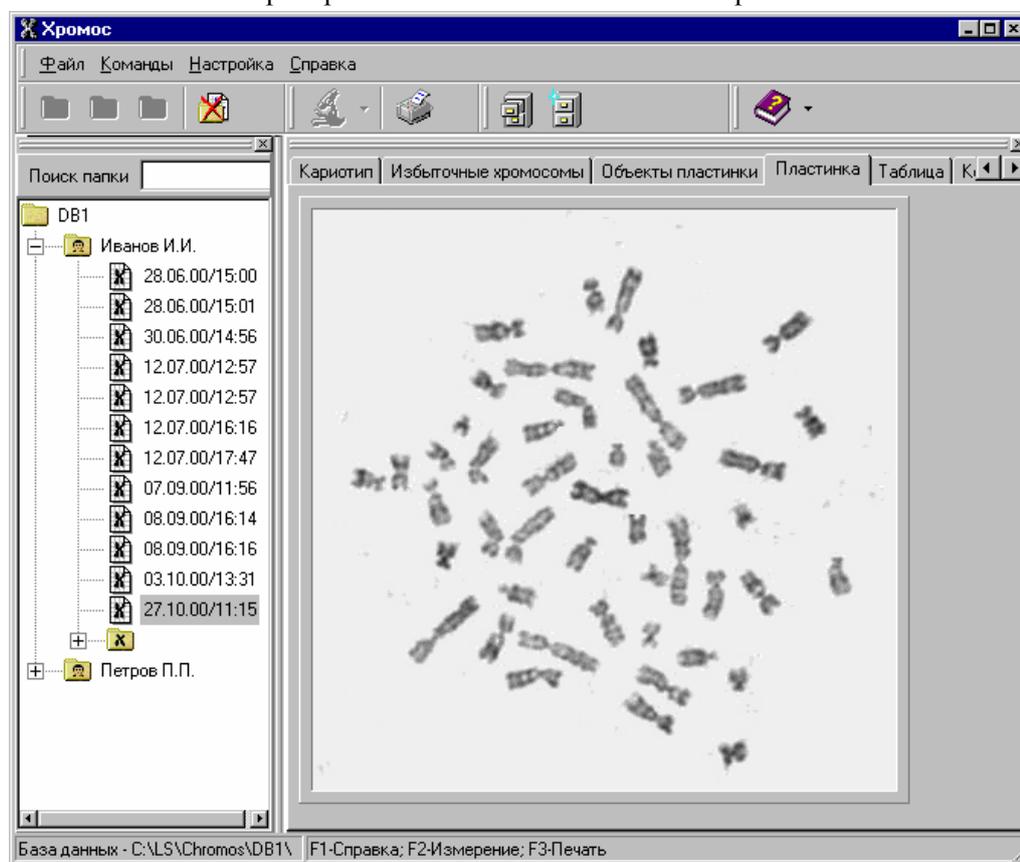


Рис. 1. Исходное изображение метафазной пластинки

Высокая стоимость зарубежных аппаратов и отсутствие отечественных разработок в этой области обусловили необходимость разработки и создания относительно недорогих компьютерных систем для генетического мониторинга.

Одним из первых шагов в этом направлении явилась разработка и создание в сотрудничестве с НИКИ радиационной медицины и эндокринологии в рамках программы «Радиоэкология» компьютерного анализатора хромосом [24], обеспечивающего повышение производительности анализа хромосом и реконструкции поглощенных биологических доз более чем в 100 раз, по сравнению с традиционными методами визуальной микроскопии, преимущественно используемой в Республике Беларусь.

Аппаратная часть системы включает высокоразрешающий оптический микроскоп, блок съема, выполненный на основе цветной камеры с жестким расстром, и цифровую кодировку изображений цитогенетических препаратов, блок управления шаговыми приводами предметного стола и узла точной фокусировки микроскопа, скоростную ПЭВМ.

Программная часть системы обеспечивает ввод и электронное редактирование изображения биопрепарата, сегментацию изображения на отдельные изолированные объекты, решение задачи распознавания: является ли каждый конкретный

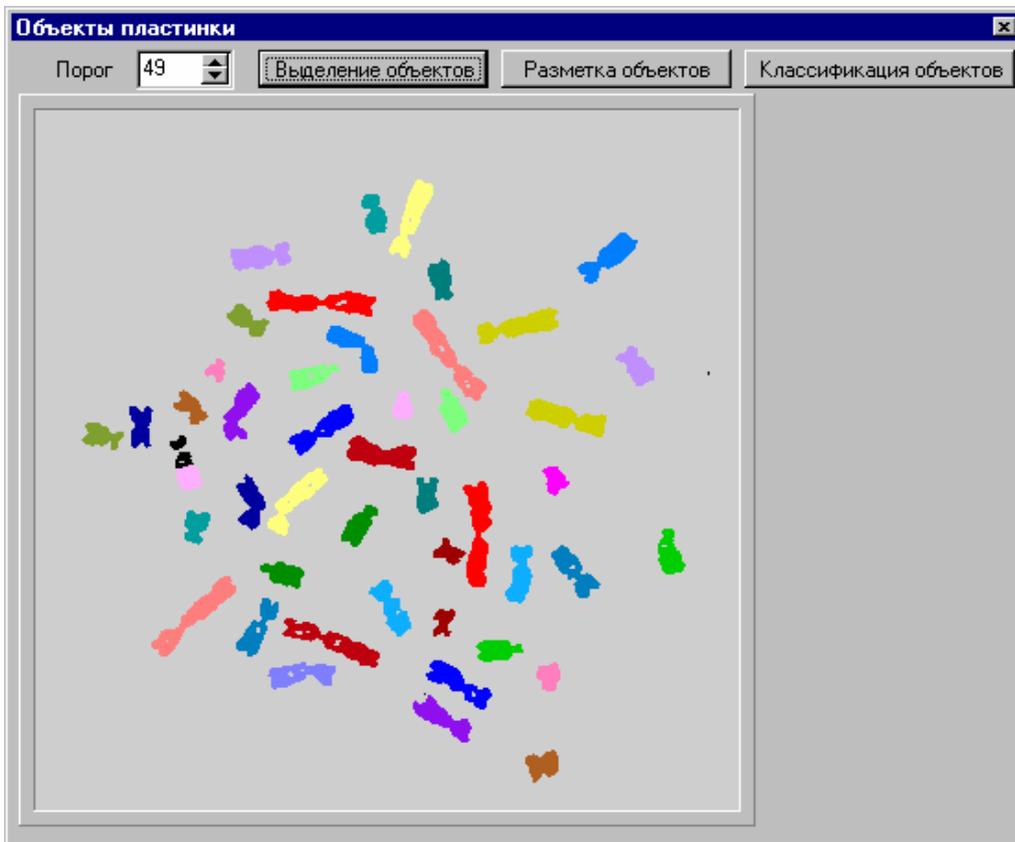


Рис. 2. Объекты пластинки, выделенные процедурой сегментации изображения

объект хромосомой, если да, то осуществляется измерение его морфометрических параметров, таких как площадь хромосомы, ее длина, периметр, длины плеч, по которым вычисляются плечевой и центромерный индексы хромосомы, суммарная длина всех хромосом и осуществляется нормировка длины каждой хромосомы по отношению к суммарной длине всех хромосом конкретной группировки (метафазной пластинки). Затем осуществляется классификация хромосом по их длине и центромерному индексу и построение кариотипа (т. е. портрета биологического вида) в соответствии с Денверской международной классификацией. Одновременно ведется учет дицентрических и кольцевых хромосом, являющихся маркерами радиационного воздействия, пропорциональная зависимость между частотой появления и дозой, как показано рядом исследователей, становится устойчивой с дозы в 0,02 Гр.

В отличие от известных систем автоматизированного анализа хромосом программная часть данной системы ориентирована на обработку больших массивов хромосомного материала. Интерфейс пользователя оптимизирован для задач массового обследования населения и позволяет оператору быстро подбирать наилучшее сочетание автоматических методов анализа и ручной корректировки их результатов на всех этапах обработки метафазной пластинки. Это дает возможность значительно повысить стабильность и достоверность результатов анализа.

На приведенных рисунках показаны программные окна, отображающие основные стадии анализа метафазной пластинки препарата.

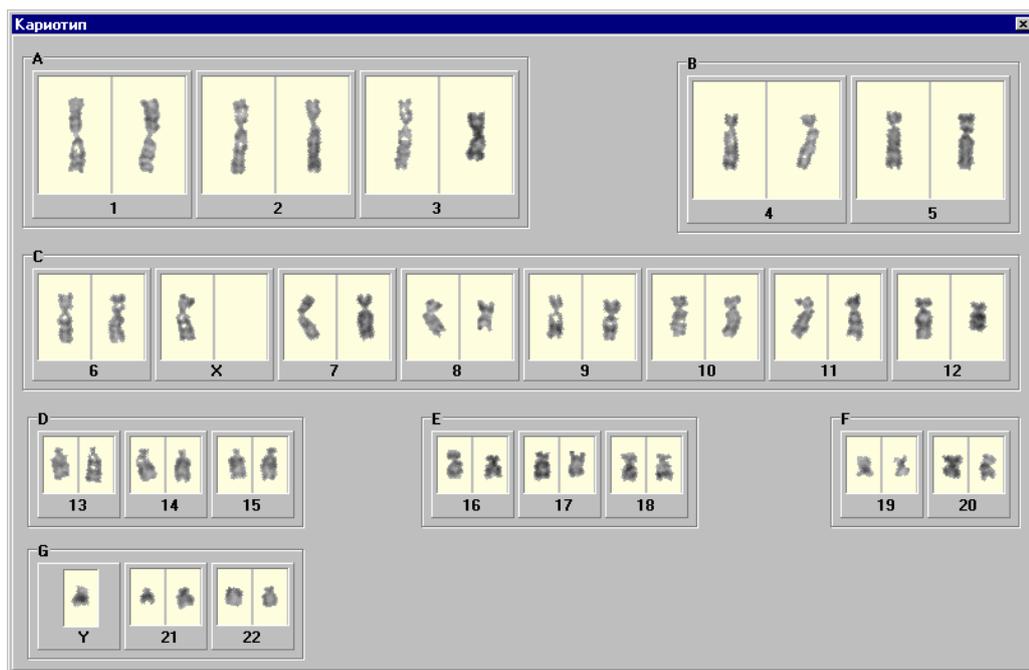


Рис. 3. Кариотип, построенный по результатам классификации объектов

Все алгоритмы, использованные в программе (выделение объектов, их разметка и классификация), являются оригинальными и по ряду показателей превосходят аналогичные известные алгоритмы.

Наряду с высокой производительностью одним из самых важных достоинств компьютерного анализа является возможность обнаружения начальных аномалий хромосом по числовым характеристикам их морфометрических признаков, а также автоматическое построение и документирование кариотипа.

Для полной реализации достоинств компьютерного анализа хромосом требуется совершенствование методик подготовки цитогенетических препаратов, в частности, направленных на минимизацию вариабельности длины хромосом в различных метафазных пластинках, минимизацию числа клеток, включившихся во 2-й и 3-й митозы; обеспечение оптимального разброса хромосом, минимизирующего число их поперечных наложений и исключаяющих продольные наложения; совершенствование методов окраски хромосом, повышающих их контрастность для возможности четкого обнаружения центромеры, спутников хромосом, хромосомного материала.

Хромосома	Площадь	Длина	П.индекс	Ц.индекс
A1(1)	513	57.1	1.08	0.48
A1(2)	551	57.6	1.11	0.47
A2(1)	538	56.2	1.58	0.39
A2(2)	509	55.6	1.96	0.34
A3(1)	466	54.7	1.43	0.41
A3(2)	422	38.5	1.10	0.48
B4(1)	411	43.0	2.54	0.28
B4(2)	403	44.0	2.86	0.26
B5(1)	432	44.9	2.84	0.26
B5(2)	446	43.7	1.53	0.40
B6(1)	362	38.1	1.79	0.36
B6(2)	360	38.4	1.42	0.41
CX(1)	333	36.3	1.39	0.42
CX(2)				
C7(1)	304	35.5	1.41	0.42
C7(2)	359	35.6	1.88	0.35
C8(1)	268	28.7	1.61	0.38
C8(2)	214	23.6	1.29	0.44
C9(1)	297	33.4	1.74	0.36
C9(2)	313	33.2	1.93	0.34
C10(1)	307	31.0	2.17	0.32
C10(2)	309	32.2	1.98	0.34
C11(1)	311	33.7	2.06	0.33
C11(2)	321	33.5	1.96	0.34
C12(1)	345	32.9	2.67	0.27
C12(2)	238	25.2	2.09	0.32
D13(1)	233	23.5	3.96	0.20

Рис. 4. Значения морфометрических параметров хромосомного набора

Данную проблему успешно решают сотрудники Научно-исследовательского клинического института радиационной медицины и эндокринологии Минздрава Республики Беларусь С. Б. Мельнов, С. Е. Семерихина и др.

Наряду с совершенствованием методик подготовки цитогенетических препаратов для решения задачи широкомасштабного генетического мониторинга нами осуществляется разработка методик и программ для статистической обработки результатов мониторинга, установления корреляционных связей между частотой генетических аномалий и экологическим состоянием территорий, социальным статусом, возрастом и общим состоянием здоровья обследуемых, разработка программ для формирования компьютерных баз данных.

В плане изучения более тонкой морфологии генетических изменений на молекулярном уровне хромосом, например исследования распределения и концентрации ДНК и других хромосоμοобразующих веществ, дальнейшее совершенствование компьютерного анализа хромосом осуществляется по пути освоения методик селективной окраски хромосом и разработки программно-аппаратных средств для высокоточного измерения спектрофотометрических характеристик хромосом при ультрафиолетовом возбуждении.

Литература

1. Иванов В. И., Малевич И. А. // Тез. докл. 5-го Всесоюз. симпоз. по распространению лазерного излучения в атмосфере. Томск, 1979. С. 3–7.
2. А. с. 803682 СССР. Способ дистанционного измерения оптических характеристик атмосферы / В. И. Иванов, И. А. Малевич, В. И. Скоморощенко. 1980.
3. А. с. 839387 СССР. Информационно-измерительная система для многопараметрического анализа атмосферы / В. И. Иванов, И. А. Малевич, В. И. Скоморощенко. 1981.
4. Иванов В. И., Малевич И. А., Чайковский А. П. Многофункциональные лидарные системы. Мн., 1986.
5. А. с. 1626913 СССР. Способ дистанционного измерения оптических характеристик атмосферы и гидросферы / В. И. Иванов, А. Н. Лазарчик, В. И. Скоморощенко. 1989.
6. А. с. 1582797 СССР. Дальномер для локационной системы / С. С. Ануфрик, В. И. Иванов, В. И. Скоморощенко, Э. Ю. Стефанович. 1989.
7. В. И. Иванов // Перспективные методы планирования и анализа экспериментов при исследовании случайных полей и процессов: Тез. докл. 3-й Всесоюз. конф. М., 1988. Ч. 2. С. 179–180.
8. А. с. 1512305 СССР. Способ лазерно-локационного измерения коэффициентов отражения / В. И. Иванов. 1989.
9. А. с. 1593429 СССР. Способ стереометрической оптической локации / В. И. Иванов. 1989.
10. А. с. 1591621 СССР. Способ определения рельефа лоцируемого объекта при импульсной локации / В. И. Иванов. 1989.
11. А. с. 1517048 СССР. Устройство для считывания изображений / В. И. Иванов, А. А. Рускевич, О. Э. Шукело, А. Н. Южаков. 1990.
12. А. с. 1508251 СССР. Устройство для считывания изображений / В. И. Иванов, А. А. Рускевич, О. Э. Шукело, А. Н. Южаков. 1990.
13. Иванов В. И., Лазарчик А. Н. // Методы и средства дистанционного зондирования Земли и обработка космической информации в интересах народного хозяйства: Тез. докл. Всесоюз. науч.-техн. конф. Рязань, 1989. Ч. 1. С. 43–45.
14. Иванов В. И., Рускевич А. А., Южаков А. Н. // Проблемы комплексной автоматизации гидрофизических исследований: Тез. докл. 5-й Всесоюз. конф. Севастополь, 1989. С. 167–169.

15. *Иванов В. И., Лазарчик А. Н.* // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1990. Т. 26, № 16. С. 1205–1210.
16. *Иванов В. И., Лазарчик А. Н.* // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 1992. Т. 28. № 3. С. 319–324.
17. *Иванов В. И.* // Методы и средства дистанционного зондирования Земли и обработка космической информации в интересах народного хозяйства: Тез. докл. Всесоюз. науч.-техн. конф. Рязань, 1989. Ч. 1. С. 39–41.
18. *Иванов В. И.* // Высокоскоростная фотография, фотоника и метрология быстротекущих процессов: Тез. докл. 14-й Всесоюз. науч.-техн. конф. М., 1989. С. 114.
19. А. с. 1609300 СССР. Устройство обработки сигналов лазерного доплеровского анемометра / В. И. Иванов, А. А. Рускевич, О. Э. Шукело, А. Н. Южаков. 1990.
20. А. с. 1518728 СССР. Способ определения параметров эллипса поляризации / В. Н. Цвирко, В. И. Иванов, И. В. Сташкевич, 1989.
21. *Иванов В. И., Рускевич А. А., Южаков А. Н.* // Приборы и техника эксперимента. 1989. № 1. С. 180–183.
22. *Иванов В. И., Цвирко В. Н., Южаков А. Н.* // Оптический, радиоволновой и тепловой методы неразрушающего контроля: Тез. докл. Всесоюз. конф. Могилев, 1989. Ч. 2. С. 147–148.
23. *Иванов В. И., Лазарчик А. Н.* // Вузовская наука: Тр. междунар. науч.-техн. конф., Мн., 2000. С. 163–167.

**RESEARCH AND DEVELOPMENTS IN THE AREA OF
MULTI-PARAMETRICAL WAVE DIAGNOSTICS
OF MATERIALS AND MEDIUMS**

V. I. Ivanov, A. N. Lazarchik

The main direction of scientific activity of the laboratory of physics of fast processes is development of the methods and systems for multi-parametrical diagnostics of different materials and media based on the usage of radio, ultrasonic and optical radiation. At earlier years of existence the laboratory was engaged in development of the methods and devices for laser remote diagnostics of stochastic scattering surfaces and media for specific applied purposes. In recent years the main efforts are concentrated on problems of overcoming of Chernobyl catastrophe consequences. In this direction several diagnostic systems were developed, in particular high-speed automatic system for analysis of human chromosomes was created for investigation and diagnostics radiation influence on genetic state of population of Republic of Belarus.

НИИ ЯП – ГОЛОВНАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ-ИСПОЛНИТЕЛЬ ГОСУДАРСТВЕННЫХ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИХ ПРОГРАММ

В. Г. Барышевский, Г. Н. Смольский, Э. Ф. Яковицкий

Катастрофа на Чернобыльской АЭС поставила перед государством ряд сложнейших экологических, медицинских, сельскохозяйственных, экономических, социальных, правовых, демографических и других проблем. К их решению были привлечены все имеющиеся в республике ученые и специалисты соответствующего профиля. Основными задачами на первом этапе после аварии были оценка радиационной обстановки и выработка срочных мер для снижения отрицательного влияния радиации на организм человека.

Радиационная обстановка в Беларуси отличается сложностью, неоднозначностью и определяется загрязнением огромных территорий альфа-, бета- и гамма-излучающими радионуклидами с различными периодами полураспада, наличием радиоизотопов практически во всех компонентах природных и техногенных экосистем и вовлечением их в геохимические и биологические циклы миграции. Все это обуславливает множественность путей внешнего и внутреннего облучения населения.

Сознавая глобальный характер катастрофы, угрозу ее последствий здоровью жителей Беларуси, Верховный Совет признал всю территорию республики зоной экологического бедствия. Разработана и реализуется Государственная программа по преодолению последствий катастрофы на Чернобыльской АЭС. Государственная политика в области преодоления последствий чернобыльской катастрофы определяется законами «О социальной защите граждан, пострадавших от катастрофы на Чернобыльской АЭС» и «О правовом режиме территорий, которые подверглись радиоактивному загрязнению в результате катастрофы на Чернобыльской АЭС».

Выполнение Государственной программы, а также принятых законов потребовало создания системы радиационного контроля Республики Беларусь, которая, в свою очередь, выявила новые требования к приборному обеспечению радиационных измерений. Это объяснялось тем, что имевшийся парк средств измерений ионизирующих излучений не был ориентирован на решение задач радиационного мониторинга на зараженных радионуклидами территориях. Кроме того, появились новые задачи массового радиационного контроля продуктов питания, сырья, воды на содержание радионуклидов цезия, стронция, плутония и трансплутониевых элементов.

Для выполнения этих задач в 1990 г. решением Правительства Республики Беларусь была принята *Республиканская научно-техническая программа по созданию и выпуску аппаратуры и оборудования для обеспечения радиометрического и дозиметрического контроля* (РНТП 18.02.р). Программа была рассчитана на период 1991–1995 гг.

Главным содержанием программы являлись разработка и выпуск приборов, обеспечивающих решение трех основных задач радиационного контроля в республике:

1) радиационный контроль всех видов пищевого сырья и продукции, в том числе массовый контроль содержания альфа-, бета-, гамма-излучающих радионуклидов «чернобыльского», естественного и техногенного происхождения в питьевой воде, продуктах питания, сельскохозяйственной продукции, лекарственном сырье и т. д.;

2) комплексный радиационный мониторинг природной среды;

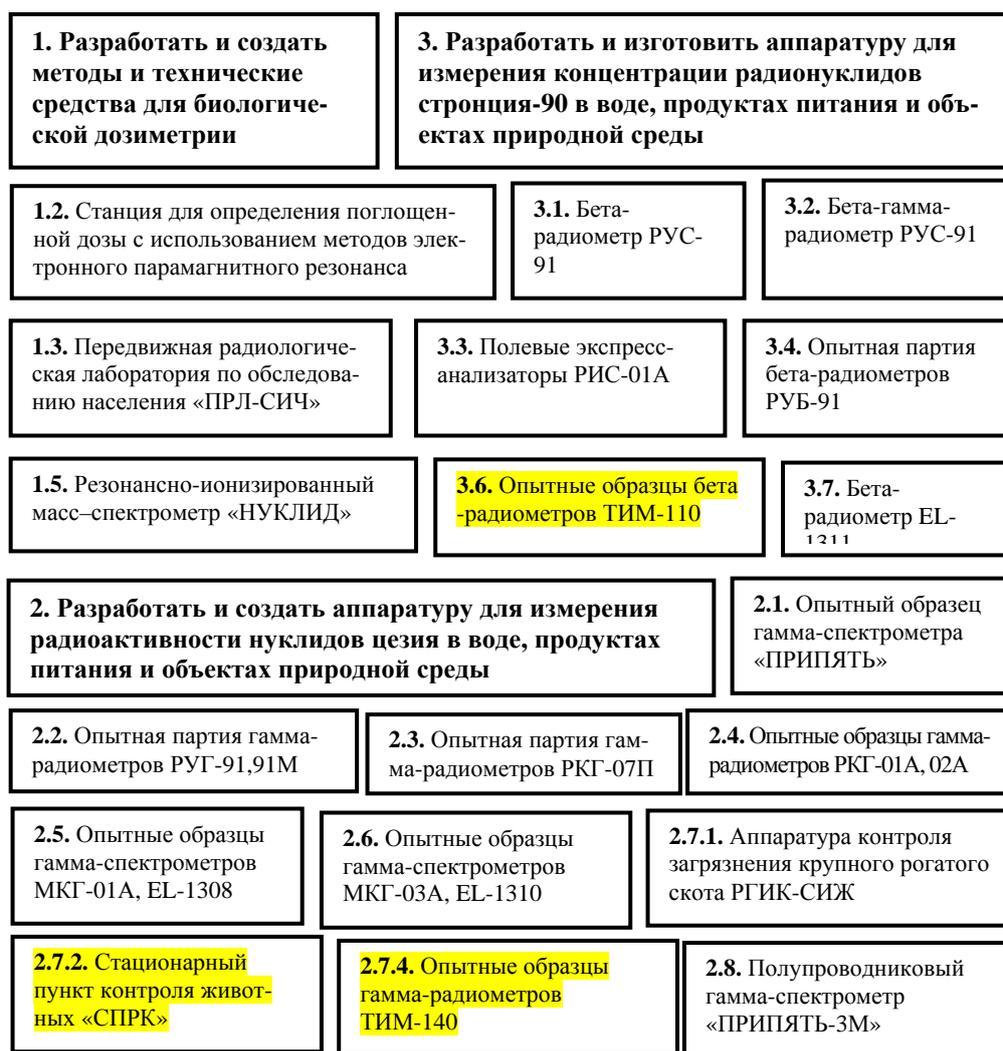
3) радиационный контроль состояния человека.

Главным исполнителем программы 18.02.р был определен Институт ядерных проблем Белгосуниверситета (НИИ ЯП БГУ).

Республиканская научно-техническая программа 18.02.р состояла из семи разделов (см. структурную схему 1; в заштрихованных прямоугольниках указана аппаратура, выполненная сотрудниками НИИ ЯП БГУ).

Структурная схема 1

Республиканской научно-технической программы 18.02.р 1991–1995 гг.



<p>4. Разработать и создать аппаратуру для измерения содержания плутония и трансплутониевых элементов в воде, продуктах питания и объектах природной среды</p>	<p>4.1. Аппаратура для определения содержания, динамики миграции плутония и трансураниевых элементов УРГ-01, КРА-01</p>	<p>4.2. Жидкостинцилляционный альфа-бета-радиометр ТИМ-100</p>	<p>4.3. Полупроводниковый альфа-спектрометр ТИМ-130</p>
<p>5. Разработать и изготовить аппаратуру для контроля внешнего гамма-фона, радиоактивного загрязнения природной среды и объектов</p>	<p>5.1. Опытная партия гамма-дозиметров ДБГ-10А</p>	<p>5.2. Опытные образцы гамма-дозиметров ДКГ-01А, EL-1101, EL-1102</p>	<p>5.3. Экспериментальный образец передвижного гамма-спектрометра «ПЕГАС-В»</p>
<p>5.4. Подвижная радиометрическая лаборатория «БПРЛ»</p>	<p>5.5. Многоцелевой носимый бета-гамма-спектрометр</p>	<p>5.6. Радиометр содержания радионуклидов в древесине «РГИК-Л»</p>	<p>5.6.5. Радиометр содержания радионуклидов в древесине на корню ТИМ-141</p>
<p>5.7. Дозиметры рентгеновского и гамма-излучения EL-1119, EL-1119С</p>	<p>5.8. Дозиметр рентгеновского излучения EL-1103</p>	<p>5.9. Бета-радиометр EL-1117</p>	<p>5.10. Бета-гамма-спектрометр ТИМ-120</p>
<p>6. Разработать и создать новые типы детекторов ионизирующих излучений и других функциональных блоков средств измерений для решения задач по защите населения республики от последствий чернобыльской катастрофы</p>	<p>6.1.2.-6.1.3. Экспериментальные образцы сцинтилляционных детекторов на основе широкоиспользуемых сцинтилляторов и новых материалов</p>	<p>7. Разработать методы и создать технические средства для системы радионуклидного мониторинга республики</p>	<p>7.1. Проведен анализ средств измерений радона. Разработано технико-экономическое задание для использования их в системе радионуклидного мониторинга республики</p>

Ниже нами представлены по разделам результаты выполнения Республиканской научно-технической программы 18.02.р

По разделу *биологическая дозиметрия* были созданы:

- экспериментальный образец лазернофотоионизационного масс-спектрометра для измерения концентрации радионуклидов в микропробах биологических и других объектов;
- опытный образец станции для определения поглощенной дозы с использованием методов электронного парамагнитного резонанса;
- опытный образец передвижной радиологической лаборатории по обследованию населения (ПРЛ-СИЧ).

По разделу *аппаратуры для измерения радиоактивности нуклидов цезия* были разработаны и организован серийный выпуск:

- гамма-радиометров «Адани» РУГ-91, РКГ-07П «Витязь», РКГ-01А, РКГ-02А;
- гамма-спектрометров МКГ-01А, МКГ-03А, ЕЛ-1308, ЕЛ-1310;
- высокочувствительного автоматизированного шестикристального гамма-спектрометра «Припять», «Припять-3М»;
- носимых радиометров для прижизненного контроля загрязнения радиоцезием крупного рогатого скота ТИМ-140.

Кроме того, в НИИ ЯП БГУ разработана аппаратура и методика выполнения измерений для контроля загрязнения крупного рогатого скота радиоцезием на мясокомбинатах и в животноводческих хозяйствах «РГИК-СИЖ», а также стационарный пункт радиометрического контроля загрязнения радиоцезием сельскохозяйственных животных «СПРК».

По разделу *разработки аппаратуры для измерения концентрации радионуклидов стронция-90* выполнены следующие работы:

- разработаны и изготовлены высокочувствительные бета-радиометры РУС-91, ТИМ-110, а также радиометр стронция-90 в молоке ЕЛ-1311;
- разработаны и серийно выпускаются бета-радиометры для определения содержания стронция-90 в продуктах питания и других пробах РУБ-91;
- разработан и обеспечен выпуск полевых экспресс-анализаторов для контроля содержания радионуклидов в природных объектах РИС-01А.

В разделе *создания аппаратуры для измерения содержания плутония и трансплутониевых элементов в объектах природной среды* разработаны:

- экспрессные инструментальные методы и аппаратура для определения содержания и динамики миграции радионуклидов плутония и трансплутониевых элементов в воде, почве и донных отложениях УРГ-01, КРА-01;
- методы и аппаратура для альфа-спектрометрии образцов различной природы – ТИМ-130.

Согласно разделу *о создании аппаратуры для контроля внешнего гамма-фона, радиоактивного загрязнения природной среды и объектов* разработаны и освоен выпуск следующих типов приборов:

- малогабаритных гамма-дозиметров с полупроводниковым детектором ДБГ-10А;
- профессиональных носимых дозиметров для измерения мощности эквивалентной дозы излучения ДКГ-01А, ЕЛ-1101, ЕЛ-1102;
- носимых широкодиапазонных дозиметров гамма-излучения аварийного назначения ЕЛ-1119;
- носимых измерителей мощности поглощенной дозы рентгеновского излучения профессионального назначения;
- профессиональных бета-радиометров поверхностной загрязненности ЕЛ-1117;
- бета-гамма-спектрометров для инструментального измерения загрязнения территорий стронцием-90 – ТИМ-120.

Кроме того, НИИ ЯП разработал и аттестовал методику выполнения измерений для определения загрязнения радиоцезием древесины и создал носимый

контактный радиометр для контроля содержания радионуклидов в древесине на корню – ТИМ-141.

Разработан и изготовлен экспериментальный образец передвижного гамма-спектрометрического комплекса вертолетного базирования для дистанционного определения содержания гамма-излучающих нуклидов в природной среде «ПЕГАС-В», а также две базовые подвижные радиометрические лаборатории (БПРЛ) для предприятий «Радон», «Полесье».

По разделу *создания новых типов детекторов ионизирующих излучений* исследованы характеристики новых типов сцинтилляторов на основе монокристаллов сложных окислов и выработаны требования к выращиванию этих кристаллов, а также созданы новые экспериментальные образцы базовых сцинтилляционных детекторов на основе широко используемых сцинтилляторов и на основе новых сцинтилляционных материалов.

По разделу *создания методов и технических средств для системы радонового мониторинга республики* выполнена поисковая научно-исследовательская работа по анализу средств измерения радона и создано технико-экономическое обеспечение на их создание и использование в системе радонового мониторинга.

Главными итогами выполнения РНТП 18.02.р в Республике Беларусь явились:

- разработка и выпуск приборов для измерения мощности дозы гамма-излучения;
- разработка и выпуск приборов для измерения радионуклидов цезия в питьевой воде, продуктах питания, сельхозпродукции и объектах природной среды;
- разработка и создание основ инструментальных средств измерения стронция-90 в воде, продуктах питания, почве и выпуск основной партии радиометров для измерения содержания стронция-90;
- создание современной передвижной радиологической лаборатории, укомплектованной спектрометрами для определения излучения человека и различными дозиметрическими и радиометрическими приборами;
- создание аппаратуры для измерения альфа-излучающих радионуклидов в пробах почвы;
- создание инструментальных средств и необходимого методического обеспечения для прижизненного радиационного контроля крупного рогатого скота и древесины на корню;
- создание нового класса сцинтилляционных материалов, перспективных для применения в дозиметрической и радиометрической аппаратуре;
- выполнение НИР по разработке экспериментального образца аэро-гамма-спектрометрического комплекса.

Выпускаемые приборы обеспечивают проведение как массовых радиометрических измерений, так и спектрометрических измерений в пробах малой активности любой природы. Все опытные образцы прошли необходимую проверку в Белстандарте, большая часть сертифицирована и включена в Государственный реестр измерений.

В соответствии с заданиями программы в 1991–1995 гг. было разработано, организовано производство и осуществлена поставка в сеть радиационного контроля республики около 4 тыс. гамма- и бета-радиометров, более 200 профессиональных дозиметров гамма-излучения, более 10 высокочувствительных спектрометров, сдана в эксплуатацию передвижная радиологическая лаборатория по обследованию населения, создан пункт радиометрического контроля автомобильного базирования для прижизненного определения удельной активности радионуклидов цезия в мышечной ткани крупных сельскохозяйственных животных. Значительная часть приборов реализована в России, Прибалтике, Австрии и других странах.

Разработанный в НИИ ЯП новый класс сцинтилляторов на конкурсной основе используется при проведении крупномасштабных экспериментов в Европейском центре ядерных исследований (ЦЕРН, Женева), предназначенных для получения информации о строении материи.

Характеристики основных приборов, разработанных и серийно выпускаемых по заданиям РНТП 18.02.р, приведены в каталоге «Приборы для радиологического мониторинга» (Минск, 1996), основные типы приборов и аппаратуры показаны нами в структурной схеме.

Для развития сети радиационного и экологического контроля в соответствии с Постановлением Совета Министров Республики Беларусь № 7 от 17 января 1997 г. НИИ ЯП БГУ в качестве головной организации выполнял Государственную научно-техническую программу **«Разработать и внедрить методы и аппаратные средства для обеспечения радиационной и экологической безопасности» («Радиоэкология»)** на период 1997—2000 гг. (см. схему 2).

По *первому* разделу программы разработаны и серийно выпускаются шесть типов приборов для системы предупреждения чрезвычайных ситуаций:

- газоаналитические приборы для анализа аммиака ССА-1 и анализа горючих газов СКГГ-1;
- многоканальный газоанализатор-сигнализатор хлора в атмосфере ССХ-1;
- портативный трехкомпонентный газоанализатор для одновременного определения в воздушном пространстве кислорода, взрывоопасных и токсичных газов;
- транспортный радиационный монитор, оборудованный дополнительным нейтронным каналом для осуществления контроля за несанкционированным перемещением радиоактивных каналов через государственные границы РМ-5000;
- интеллектуальный датчик мощности дозы гамма-излучения для автоматической сети радиационного мониторинга окружающей среды;
- измеритель-сигнализатор мощности дозы рентгеновского и гамма-излучения для обеспечения радиационной безопасности работ в радиоизотопных и радиологических лабораториях.

По разделу *аппаратуры для системы экологического контроля природной среды*:

- разработан контрольно-измерительный комплекс аппаратуры для снижения загрязнения окружающей среды при изготовлении асфальтобитумных смесей;

- подготовлен к выпуску автоматизированный газожидкостный хроматографический комплекс для экспрессного анализа содержания гербицидов, пестицидов, инсектицидов и других токсичных веществ в продуктах питания и объектах природной среды.

По третьему разделу (*аппаратура для обеспечения радиационной безопасности*) разработано 10 новых типов опытных образцов приборов:

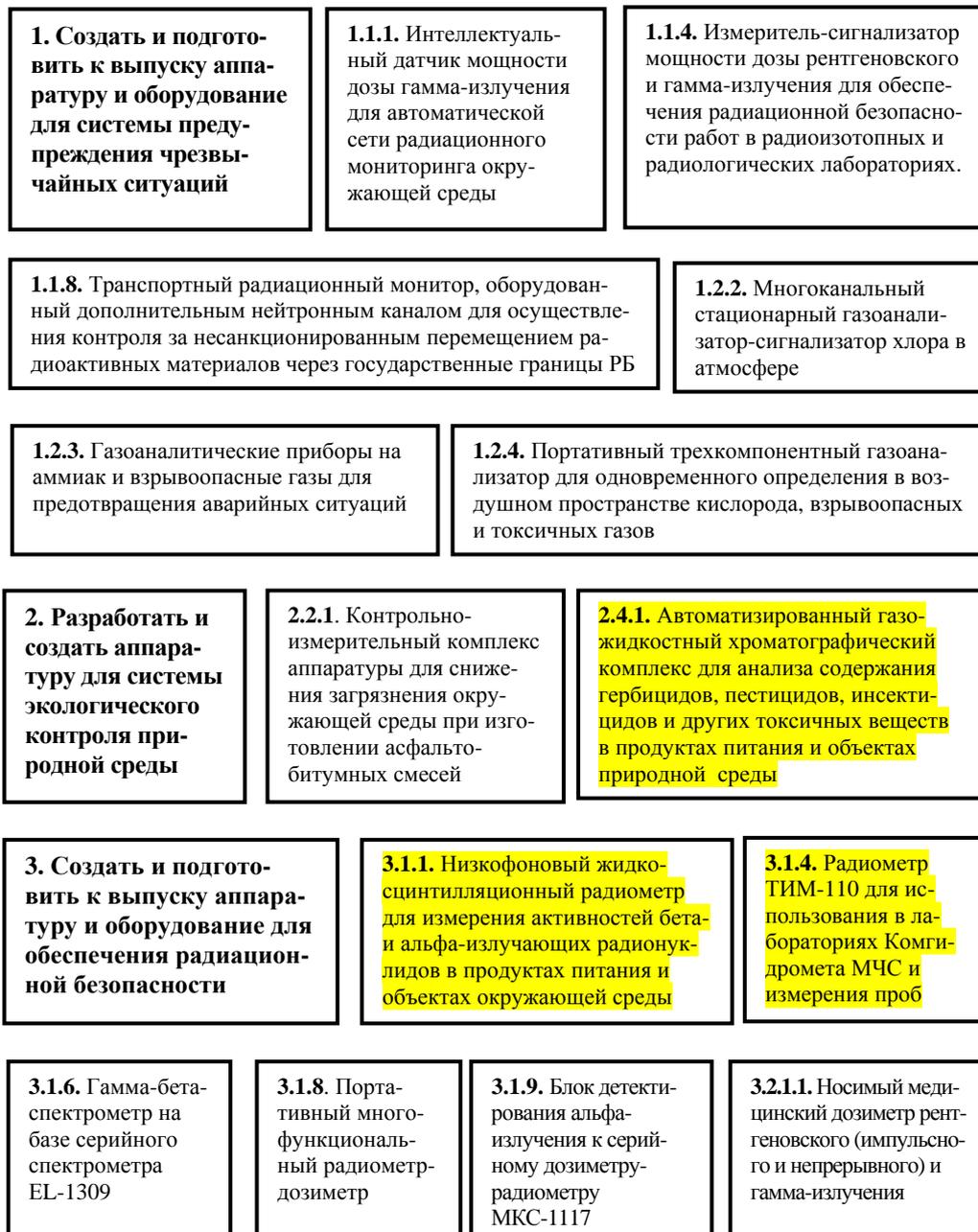
- модернизированный и усовершенствованный радиатор ТИМ-110 для лабораторий Госкомгидромета и для измерений проб золы;
- низкофоновый жидкосцинтилляционный радиометр для измерения активности бета- и альфа-излучающих радионуклидов в продуктах питания и объектах окружающей среды;
- бета-гамма-спектрометр на базе серийного спектрометра EL-1309-МКС-АТ-1315;
- блок детектирования альфа-излучения к серийному дозиметру-радиометру МКС-1117;
- цифровой персональный системный дозиметр рентгеновского и гамма-излучения с устройством считывания ДКС-АТ-3509;
- носимый медицинский дозиметр рентгеновского (импульсного и непрерывного) и гамма-излучения ДКС-АТ-1121;
- калибровочные стенды двух типов для обеспечения высококачественной поверки клинических, защитных и мониторинговых дозиметров АТ-01 и АТ-02;
- микропроцессорный поисковый портативный радиометр для обнаружения и локализации радиоактивных материалов МКС-РМ-1402;
- клинический дозиметр рентгеновского и гамма-излучения ДКС-АТ-5350;
- компьютерный цитометр нового поколения для дифференциальной диагностики заболеваний щитовидной железы.

Для компьютерного цитометра разработана методика и программное обеспечение для тонкой дифференциальной диагностики заболеваний щитовидной железы путем сравнительной оценки изображений цитологического материала с эталонными матрицами электронного атласа. На основе этой методики Министерство здравоохранения утвердило методические рекомендации «Экспертная система для цитологической диагностики заболеваний щитовидной железы» для практической помощи врачу-цитологу в постановке диагноза.

Выполнена научно-исследовательская работа по разработке и изготовлению макета бета-гамма-СИЧ. Актуальность проведенной работы заключается в том, что в Беларуси, которая является одним из немногих мест в мире с обширным цезиево-стронциевым загрязнением, отсутствует аппаратура, способная непосредственно измерять содержание стронция-90 в организме человека. По результатам НИР планируется создание измерительного комплекса «Экспертный бета-гамма-СИЧ».

Структурная схема 2

Государственной научно-технической программы «Разработать и внедрить методы и аппаратные средства для обеспечения радиационной и экологической безопасности» («Радиоэкология»). 1997—2000 гг.



<p>3.2.1.2. Цифровой персональный системный дозиметр рентгеновского и гамма-излучения с устройством считывания</p>	<p>3.2.1.4. Микропроцессорный поисковый портативный радиометр для обнаружения и локализации радиоактивных материалов</p>	<p>3.2.1.5. Калибровочные стенды 2 типов для обеспечения высококачественной поверки клинических, защитных и мониторинговых дозиметров</p>	
<p>3.2.2.2. Клинический дозиметр рентгеновского и гамма-излучения</p>	<p>3.2.2.3.1. Методика и программное обеспечение для тонкой дифференциальной диагностики заболеваний щитовидной железы путем сравнительной оценки изображений цитологического материала с эталонными матрицами электронного атласа</p>	<p>3.2.2.7. Макет бета-гамма-СИЧ</p>	
<p>4. Методическое и метрологическое обеспечение радиационных измерений</p>	<p>4.3.1. Методика выполнения измерений на бета-гамма-радиометр EL 1311 с целью обеспечения контроля содержания стронция-90 и цезия-137 в продуктах питания</p>	<p>4.3.2. Методики определения стронция-90 в пробах почвы, воды и продуктах питания</p>	<p>4.3.3. Методика определения удельной активности стронция-90 в воде по черенковскому излучению</p>
<p>4.3.4. Методики пробоподготовки и концентрирования радионуклидов стронция и цезия в воде</p>	<p>4.3.5. Методики радиометрических измерений образцов с многокомпонентным составом нуклидов</p>	<p>4.3.6. Методика отбора проб сточных вод и их осадков, твердых бытовых зольных отходов и уличного смета для определения содержания в них радионуклидов</p>	<p>4.3.10. Методика пробоподготовки сточных вод для радиохимического анализа стронция-90</p>
<p>4.3.13. Радиометрическая методика выполнения экспрессных измерений для контрольных уровней определяемых параметров</p>		<p>4.3.14. Методика экспрессного определения содержания изотопов плутония и америция в почвах</p>	
<p>5. Разработать и создать аппаратно-методическую базу для радиационного мониторинга радона</p>	<p>5.1.1. Радиометры радона в воздухе с использованием электрических полей для концентрирования дочерних продуктов распада, методика выполнения измерений</p>	<p>5.3.1. Радиометр эксхалляции радона из строительных материалов и изделий</p>	
<p>5.4.1. Методика регистрации радона в воздухе жилых помещений с применением угольных сорбентов</p>	<p>5.4.4. Методика выполнения измерений на сцинтилляционные гамма-спектрометры типа EL-1309 с целью обеспечения контроля содержания цезия-137 и естественных радионуклидов радия-226, тория-232, калия-40 в строительных материалах и изделиях</p>		
<p>6. Разработать новые принципы построения ядерно-физической и электронно-физической аппаратуры</p>	<p>6.1. Многоканальный быстродействующий сцинтилляционный детектор для медицинской радиологии</p>		

В целях методического обеспечения радиационных измерений разработано 11 методик, что в настоящее время чрезвычайно актуально в связи с необходимостью выполнения требований Закона Республики Беларусь «О радиационной безопасности населения» и соблюдения норм радиационной безопасности НРБ-2000. На выполнение этих требований ориентированы методики:

- регистрации радона в воздухе жилых помещений с применением угольных сорбентов;
- выполнения измерений на бета-гамма-радиометре EL-1311 в целях обеспечения контроля содержания стронция-90, цезия-137 в продуктах питания;
- селективного выделения стронция-90, цезия-137 из природных вод и молока;
- измерений на спектрометре типа EL-1309 в целях обеспечения контроля содержания цезия-137 и естественных радионуклидов радия-226, тория-232, калия-40 в строительных материалах и изделиях;
- экспрессного определения содержания изотопов плутония и америция в почве.

В плане создания аппаратуры для радиационного мониторинга радона созданы опытные образцы двух типов приборов:

- радиометра радона в воздухе с использованием электрических полей для концентрирования дочерних продуктов распада;
- радиометра эксхалации радона из строительных материалов и изделий.

По разделу *разработки новых принципов построения ядерно-физической и электронно-физической аппаратуры* разработан и создан экспериментальный образец многоканального быстродействующего сцинтилляционного детектора для медицинской радиологии.

Основными результатами выполнения Государственной научно-технической программы «Радиоэкология» явились:

- разработка и выпуск новых серий приборов для системы предупреждения чрезвычайных ситуаций;
- разработка аппаратуры для системы экологического контроля природной среды;
- разработка и серийный выпуск приборов для сети радиационного контроля, в том числе приборов для контроля альфа-излучения и спектрометров бета-излучения;
- выпуск новых серий приборов по контролю рентгеновского (импульсного и непрерывного) и гамма-излучения для медицинской дозиметрии;
- выполнение научно-исследовательской работы и подготовка к изготовлению экспертного бета-гамма-СИЧ.

Всего по заданиям ГНТП «Радиоэкология» разработаны 20 типов новых опытных образцов приборов и аппаратуры, один макет и 12 методик, используемых в системе радиационного контроля. Анализ заявок на 2001 г. по серийно выпускаемым приборам показывает, что приблизительно 40 % приборов будут поставлены в Республику Беларусь, 40 % – в Россию и 20 % – на экспорт в страны дальнего зарубежья.

Подводя итоги работ по указанным программам, можно с уверенностью сказать, что не только были выполнены поставленные задачи, но и фактически

развита целая отрасль промышленности Республики Беларусь, которая выпускает конкурентоспособную на внешнем рынке продукцию и решает проблемы обеспечения республики соответствующей аппаратурой.

INP AS THE LEADING EXECUTIVE CENTER OF STATE SCIENTIFIC AND TECHNICAL PROGRAMMES

V. G. Baryshevsky, G. N. Smolsky, E. F. Yakovitsky

Following the Chernobyl nuclear power station accident about 70 % of radioactive matter having occurred in the atmosphere of the European part of the USSR fell on the territory of Belarus. As that 23 % of our territory was polluted by radionuclides Cs-137 more than 37 kBk/m². The scale of the catastrophe demanded extraordinary measures and above all development of the system of radiation control. To work up and produce devices providing radiometric and dosimetric control in Republic of Belarus it was adopted two State scientific and technical programmes for periods of 1991–1995 and 1997–2000. Leading executive center for these programmes was assigned Institute for Nuclear Problems. In the article we consider scopes and problems solved during realization of scientific and technical programmes. It was shown that the nuclear-physical instrument-making industry was built up in Republic of Belarus. This industry is able to create and provide the functioning of the system of radiation control. The considerable part of devices produced are exported abroad.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Барышевский В. Г. Фундаментальные и прикладные физические исследования в НИИ ЯП (1986–2001)	5
--	---

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Барышевский В. Г. Т-неинвариантная оптическая анизотропия и гиротропия...	19
Тихомиров В. В. Исследование эффектов квантовой электродинамики в интенсивных внутрикристаллических полях.....	47
Тихомиров В. В., Юралеви́ч С. Э. К возможности присутствия первичных черных дыр в космических объектах	81
Максименко С. А., Слепян Г. Я. Электродинамика квазиодномерных структур углерода: идеи, методы, перспективы	87
Дойников А. А. Нелинейная динамика дисперсных частиц в акустических полях.	119
Бондарев И. В. Позитроний-фононные взаимодействия и аннигиляционное излучение квантов 2γ -распада позитрония в ионных кристаллах.....	132
Прокопович И. П. Высокоинтенсивные фемтосекундные и аттосекундные лазерные импульсы сверхширокого спектрального диапазона	146
Грубич А. О. К вопросу наблюдения дискретных состояний при флуктуациях в макроскопических системах.....	157

ЛАЗЕРЫ НА СВОБОДНЫХ ЭЛЕКТРОНАХ

Барышевский В. Г. Объемные лазеры на свободных электронах.....	166
Барышевский В. Г., Батраков К. Г., Гуринович А. А., Ильенко И. И., Лобко А. С., Мороз В. И., Софронов П. Ф., Столярский В. И. Первое наблюдение генерации в объемном лазере на свободных электронах.....	170
Батраков К. Г. Некоторые теоретические вопросы пучковой неустойчивости в объемных пространственно-периодических структурах.....	175
Сытова С. Н. Численные методы в моделировании объемных лазеров на свободных электронах.....	212
Батраков К. Г., Лобко А. С. Квазиоптический метод измерения диэлектрической проницаемости в миллиметровом диапазоне частот.....	226
Дубовская И. Я. Параметрическое рентгеновское излучение в условиях многоволновой дифракции фотонов.....	232
Дубовская И. Я., Луговская О. М. Дифракционное излучение релятивистского осциллятора	245
Луговская О. М. Параметрическое рентгеновское излучение в кристаллах.....	260

ПРИКЛАДНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Алексеев Г. Д., Батурицкий М. А., Дворников О. В., Михайлов В. А., Токменин В. В., Хохлов А. И., Шишкин А. А. Многоканальная интегральная электроника для газовых проволочных детекторов.....	278
Родионова В. Н., Карпович В. А., Слепян Г. Я. Исследования в СВЧ-диапазоне: электродинамика резонансных систем, приборы и оборудование для решения научных и прикладных задач.....	295

Бокучава Г. Д., Кузьмин Е. С., Кутень И. С., Кутень С. А., Жук В. В., Хрущинский А. А. Применение методов Монте-Карло в проблеме юстировки время-пролетных нейтронных спектрометров	312
Черепица С. В., Бычков С. М., Гациха С. В., Коваленко А. Н., Мазаник А. Л., Макоед Н. М. Применение компьютерной системы автоматизации хроматографических измерений ЮниХром.....	322
Иванов В. И., Лазарчик А. Н. Исследования и разработки в области многопараметрической волновой диагностики материалов и сред.....	334
Барышевский В. Г., Смольский Г. Н., Яковицкий Э. Ф. НИИ ЯП – головная организация-исполнитель государственных научно-технических программ.....	341

ДЕТЕКТОРЫ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ

Коржик М. В. Роль сцинтилляционных детекторов в ядерно-физических измерениях.....	352
Коржик М. В., Борисевич А. Е., Дробышев Г. Ю., Зуевский Р. Ф., Мисевич О. В., Федоров А. А. Сцинтилляционный материал вольфрамата свинца.....	357
Коржик М. В., Мисевич О. В., Федоров А. А., Дробышев Г. Ю., Зуевский Р. Ф., Панов В. В. Особенности сертификации сцинтилляционных параметров кристаллов вольфрамата свинца в условиях массового производства.....	375
Коржик М. В., Лопатик А. Р., Мисевич О. В., Федоров А. А. Световые источники для точной электромагнитной калориметрии в условиях интенсивных радиационных полей.....	387
Коржик М. В., Федоров А. А. Сцинтилляционные кристаллы на основе редкоземельных алюминиевых перовскитов.....	396
Коржик М. В., Мисевич О. В., Федоров А. А., Холмецкий А. Л. Быстродействующие сцинтилляционные детекторы для мессбауэровской спектроскопии..	422
Коржик М. В., Лобко А. С., Мисевич О. В., Федоров А. А. Сцинтилляционные материалы для ядерной медицины.....	432
Коржик М. В., Лобко А. С., Мисевич О. В., Федоров А. А. Матричный детектор для позиционной эмиссионной томографии.....	442

CONTENTS

Baryshevsky V. G. Fundamental and applied physical research in INP (1986–2001)....	5
---	---

THEORETICAL RESEARCH

Baryshevsky V. G. Time-reversal-violating optical anisotropy and gyrotropy	19
Tikhomirov V. V. Investigation of the effects of quantum electrodynamics in strong crystal fields.....	47
Tikhomirov V. V., Juralevich S. E. To the possibility of primordial black holes presence in cosmic objects.....	81
Maksimenco S. A., Slepyan G. Ya. Electrodynamics of quasi-one-dimensional carbon structures: ideas, approaches, perspectives.....	87
Doinikov A. A. Nonlinear dynamics of dispersed particles in acoustic fields.....	119
Bondarev I. V. Positronium-phonon interactions and annihilation radiation of positronium 2γ -decay quanta in ionic crystals.....	132
Prokopovich I. P. High-intensity femtosecond and attosecond laser pulses with superbroadened spectra.....	146
Grubich A. O. About supervision of discrete condition at fluctuation in macroscopic systems.....	157

FREE ELECTRON LASERS

Baryshevsky V. G. Volume free electron lasers	166
Baryshevsky V. G., Batrakov K. G., Gurinovich A. A., Iliencko I. I., Lobko A. S., Moroz V. I., Sofronov P. F., Stolayrsky V. I. The first lasing of volume free electron laser	170
Batrakov K. G. Some theoretical questions of beam instabilities in volume spatially-periodic structures	175
Sytova S. N. Numerical methods in modeling of volume free electron lasers.....	212
Batrakov K. G., Lobko A. S. Quasi-optical method of dielectric constant measurement in a millimeter waveband.....	226
Dubovskaya I. Ya. Parametric X-ray radiation under the condition of multi-wave diffraction.....	232
Dubovskaya I. Ya., Lugovskaya O. M. Diffraction radiation from relativistic oscillator.....	245
Lugovskaya O. M. Parametrical X-radiation in crystals.....	260

APPLIED RESEARCH

Alexeev G. D., Baturitsky M. A., Dvornikov O. V., Mikhailov V. A., Tokmenin V. V., Khokhlov A. I., Shishkin A. A. Multichannel monolithic electronics for gaseous wire detectors.....	278
Rodionova V. N., Karpovich V. A., Slepyan G. Ya. Research, design and development in microwaves: resonance systems, devices and equipment.....	295
Bokuchava G. D., Kuzmin E. S., Kuten I. S., Kuten S. A., Zhuk V. V., Khrutchinsky A. A. Application of Monte-Carlo methods in problem of adjustment of time-of-flight neutron spectrometers	312
Charapitsa S. V., Bychkov S. M., Gatsiha S. V., Kavalenka A. N., Mazanik A. L., Makaed N. M. Application of the chromatographic data system UniChrom.....	322

Ivanov V. I., Lazarchik A. N. Research and developments in the area of multi-parametrical wave diagnostics of materials and mediums	334
Baryshevsky V. G., Smolsky G. N., Yakovitsky E. F. INP as the leading executive center of State scientific and technical programmes.	341

IONIZING RADIATION DETECTORS

Korzhik M. V. The role of scintillation detectors in nuclear-physics measurements...	352
Korzhik M. V., Borisevich A. E., Drobyshev G. Yu., Zuyeski R. F., Missevitch O. V., Fedorov A. A. Lead tungstate scintillation material.....	357
Korzhik M. V., Missevitch O. V., Fedorov A. A., Drobyshev G. Yu., Zuyeski R. F., Panov V. V. Certification peculiarity of lead tungstate crystals scintillation parameters at mass production conditions.....	375
Korzhik M. V., Lopatik A. R., Missevitch O. V., Fedorov A. A. Light sources for precise electromagnetic calorimetry in intense radiation fields.....	387
Korzhik M. V., Fedorov A. A. Scintillation crystals on the basis of rare-earth aluminum perovskites	396
Korzhik M. V., Missevitch O. V., Fedorov A. A., Kholmetskii A. L. Fast scintillation detectors for mössbauer spectroscopy.....	422
M. V. Korzhik, Lobko A. S., Missevitch O. V., Fedorov A. A. Scintillation materials for nuclear medicine.....	432
M. V. Korzhik, Lobko A. S., Missevitch O. V., Fedorov A. A. Detector matrix for positron emission tomography.....	442

Научное издание

**ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ
И ПРИКЛАДНЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ
ИССЛЕДОВАНИЯ
1986–2001 гг.**

Сборник трудов

Редактор *Г. В. Лозовская*
Технический редактор *Т. К. Раманович*
Корректор *Н. Н. Герасимович*
Компьютерная верстка *С. Н. Сытовой*

Подписано в печать 29.10.2001. Формат 70×100/16. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.
Печать офсетная. Усл. печ. л. 48,37. Уч.-изд. л. 44,6. Тираж 250 экз. Зак. 199

Налоговая льгота – Общегосударственный классификатор
Республики Беларусь ОКРБ 007-98, ч. 1; 22.11.20.500.

Белорусский государственный университет.
Лицензия ЛВ № 315 от 14.07.98.
220050, Минск, проспект Франциска Скорины, 4.

Отпечатано в Республиканском унитарном предприятии
«Издательский центр БГУ».
Лицензия ЛП № 461 от 14.08.2001.
220030, Минск, ул. Красноармейская, 6.