

сообщения  
объединенного  
института  
ядерных  
исследований  
Дубна

Ж 911

P9-90-34

В. В. Журавлев, В. Н. Замрий, Е. И. Литвиненко,  
Т. Л. Пикельнер, А. Б. Роганов, А. К. Самойлов

АППАРАТУРНО-ПРОГРАММНЫЕ  
СРЕДСТВА АВТОМАТИЗАЦИИ  
ПРОВОДКИ ПУЧКА УСКОРЯЕМЫХ ЭЛЕКТРОНОВ

1990

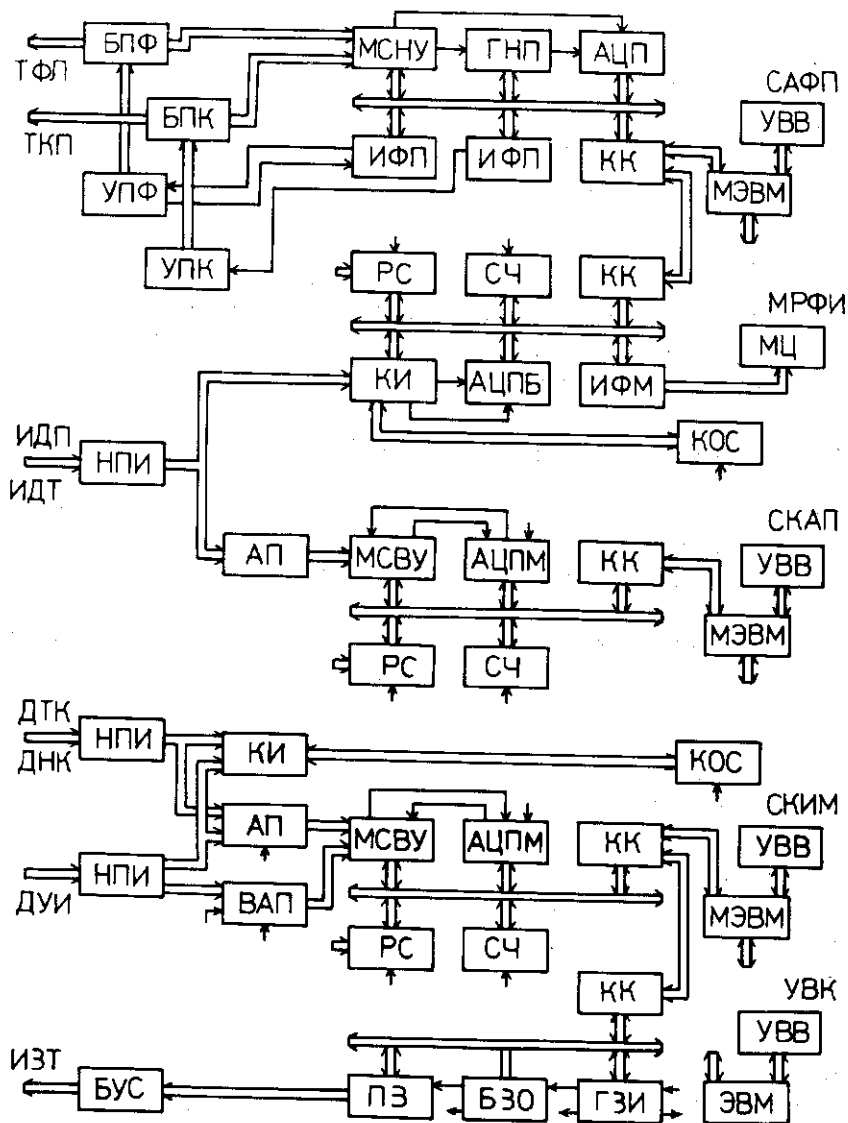
С целью обеспечения исследований и пусковых работ на инжекторном и ускорительных участках линейного индукционного ускорителя (ЛИУ)<sup>11/</sup> в Лаборатории нейтронной физики ОИЯИ созданы аппаратно-программные средства автоматизации проводки импульсного пучка ускоряемых электронов. За основу автоматизированной системы измерений и управления (АСИУ)<sup>12/</sup> принята многоуровневая иерархическая структура с децентрализованным управлением. Ее подсистемы реального времени, синхронизированные с одиночным или повторяющимся (с частотой до 50 Гц) циклом ускорения, проектировались с учетом их функционального назначения, а также возможного распределения ожидаемых информационных потоков (контроль ~ 400 импульсных параметров, ~ 500 аналоговых и ~ 400 двухпозиционных сигналов, а также управление по ~ 300 каналам) и времени обработки. В их числе необходимые для проводки пучка подсистемы автоматизации фокусировки и коррекции положения пучка (САФП и СКАП — контроль и управление величинами токов 76 источников питания фокусирующих линз и 66 источников питания двухкоординатных корректоров, амплитуды импульсных сигналов 35 и 25 магнитоиндукционных датчиков<sup>13/</sup> положения и тока пучка), подсистемы контроля и синхронизации импульсов модуляторов (СКИМ — контроль амплитуды и задержки ускоряющих импульсов, амплитуды тока тиратронов 52 модуляторов, коррекция задержек), а также централизованного контроля данных технологического оборудования ЛИУ (СЦКД — контроль аналоговых и двухпозиционных сигналов датчиков охлаждения, вакуума, защиты и др.). Подсистемы, построенные на основе магистрально-модульной структуры КАМАК, микроЭВМ (МЭВМ) и устройств ввода и вывода данных (УВВ), объединяются с вычислительно-управляющим комплексом (УВК) на основе более мощной, программно-совместимой ЭВМ с развитой периферией для координации и поддержки МЭВМ, архивизации и выдачи обобщенной информации АСИУ с целью управления ЛИУ.

Этапами создания АСИУ явились разработки отдельных стенов и модулей для обеспечения наиболее актуальных измерений. При этом учитывалось требование уменьшить время измерения и контроля отклонений импульсных параметров до 10-20 мс, а также обеспечить принятие решений о коррекции процесса проводки пучка или о его отключении (в аварийных ситуациях) до начала очередного цикла ускорения. Боль-

шие протяженности (~ 100-300 м) и разнообразие измерительных и управляющих линий, широкий диапазон величин и частотных спектров сигналов и помех, большие мощности пучка и оборудования ЛИУ выдвигают серьезные требования к создаваемой АСИУ. Предварительные исследования и разработки позволили определить выбор направления и методов, в том числе помехоустойчивости прецизионных измерений<sup>14</sup> и контроля аналоговых параметров<sup>15</sup>, нормировки сигналов СКАП<sup>16</sup> и выполнения операций деления в ходе измерений<sup>17</sup>, преобразований и измерений импульсных параметров<sup>18</sup>, распределения аналоговых данных по каналам управления<sup>19</sup>. Для настройки электронно-оптических элементов, когда наряду с амплитудой тока и величиной смещения "центра тяжести пучка" в выбранной точке ускорительного тракта необходимо регистрировать форму импульса тока, причем его площадь (заряд) является критерием эффективности используемого алгоритма, разработан многоканальный регистратор формы импульсных сигналов МРФИ<sup>10</sup>.

Завершенным этапом работ является создание действующего комплекса аппаратурно-программных средств для инжекторного и первого ускорительного участков ЛИУ (см. рисунок). Обозначения блоков подсистем: БПФ и БПК — блоки питания фокусирующих линз и корректоров, УПФ и УПК — блоки управления группами БПФ и БПК, МСНУ — модули мультиплексора аналоговых сигналов низкого уровня, ГНП — групповой нормирующий преобразователь, АЦП — аналого-цифровой преобразователь, ИФП — интерфейс последовательной связи, КК — контроллер крейта, РС — синхронный регистр, СЧ — счетчик циклов, НПИ — нормирующий преобразователь импульсов, КИ — коммутаторы импульсов, АЦПБ — быстрый АЦП, ИФМ — интерфейс связи с монитором, МЦ — цветной монитор, КОС — контрольные осциллографы, АП — модули аналоговой памяти, МСВУ — модули мультиплексора аналоговых сигналов высокого уровня, АЦПМ — многоканальный АЦП с буферной памятью, ВАП — модули аналоговой памяти с времязапамятным преобразователем, БУС — блоки усиления сигналов, ПЗ — модули переключателей задержки, БЗО — блок начальной задержки, ГЗИ — генератор задания частоты импульсов ЛИУ.

В САФП сигналы напряжения, пропорциональные величинам токов 38 блоков БПФ (типа БТ-1004А<sup>11</sup>, с входом управления), а также 24 блоков БПК<sup>12</sup>, снимаемые с резистивных датчиков тока (0,125 и 0,025 Ом), передаются по симметричным кабелям со скрученными парами в экране (~ 100 м, ТСВ-30х2х0,5) на помехозащищенные изолированные модули 32-входовых МСНУ<sup>13</sup>, затем общий ГНП<sup>14</sup> и 12-разрядный АЦП<sup>15</sup>. При программируемом выборе входов (3 модуля МСНУ первой ступени связаны с МСНУ второй ступени) поступаю-



щий в АЦП импульс запуска задержан на время ( $\sim 200$  мс) установления измеряемого сигнала (с погрешностью 0,1%). Данные из АЦП вводятся в МЭВМ MERA-60 через типовой КК (К106А). По результатам работы программы устанавливаются адреса блоков БПФ и БПК, а также значения их токов (до 15 А и  $\pm 12$  А). Байты этих данных передаются на  $\sim 100$  м через ИФП (типа КИ 025<sup>16</sup>) в группу из 5 блоков УПФ или 3 блоков УПК (с изолированной линией последовательной связи и другими средствами защиты от помех и ошибок)<sup>19</sup>. В адресуемом

блоке УПК (УПФ) выполняется прием (и ответная передача), распределение данных в один из 8 каналов и преобразование в аналоговый сигнал  $\pm (0-5)$  В с погрешностью 0,4% (0,1)% за время 2 мс (8 мс). Таблицы измеренных величин токов выводятся на дисплей (СМ 7209) и печать (DZM 180) в виде протокола.

В МРФИ сигналы 13 датчиков тока и 12 датчиков положения пучка (ДП и ДТ) выбираются при помощи КИ (2 коммутатора КП и один КТ)<sup>110/</sup> по программе МЭВМ или вручную с пульта КОС. Импульс с заземленной обмотки ДТ и импульсы с 4 одинаковых обмоток ДП, сумма которых также характеризует ток пучка, подаются по коаксиальным линиям (от 50 до 100 м) на панель НПИ (с импульсными трансформаторами)<sup>117/</sup> для их согласования и гальванического разделения. Коммутируемые в КТ (или в КП) сигналы с амплитудой 0-5 В и фронтом до 100 нс (150 нс после сумматора) подаются на АЦПБ<sup>110/</sup>, запускаемый импульсом первого ДП. Далее с периодом 30 или 20 нс (для первого и второго вариантов схемы) отсчитывается задержка, программно устанавливаемая с учетом времени пролета пучка электронов и задержки сигнала в измерительных кабелях и преобразователях. Затем 64 значения сигнала с тем же периодом выбираются, преобразуются и запоминаются. Данные АЦПБ, характеризующие форму импульсов тока пучка ( $\sim 300-1200$  нс), вводятся в МЭВМ для использования в программе настройки тракта ЛИУ. Форма импульсов выбранной группы 6 датчиков может быть выведена в виде 6 цветных графиков через ИФМ (КИ 029<sup>118/</sup>) на МЦ (типа МС-6А), а также на печать.

В СКАП импульсы ДП и ДТ подаются с выходов 61 НПИ на входы 8 модулей АП-8<sup>117/</sup>. В этих модулях обеспечивается запоминание амплитуды (0,02-5 В) 8 сигналов с временем запоминания до 0,3 мкс и погрешностью до 0,1% при времени хранения  $\sim 1-10$  мс, а также возможность синхронного сброса и блокировки. Для уменьшения времени измерений применены 3 модуля более быстрой модификации МСВУ<sup>18,13/</sup> и 12-разрядный АЦПМ<sup>119/</sup> с программируемым периодом преобразования и емкостью буферной памяти (1-255 или 1-1023 данных для первого и второго вариантов). В АЦПМ, запускаемом синхронно с циклом ЛИУ, обеспечивается сканирование сигналов  $\sim 60$  измерительных каналов и с необходимой задержкой осуществляется выборка, преобразование и запоминание их значений с периодом 10-20 мкс. Для определения смещения пучка (по координатам X и Y) требуется достаточно быстрое деление разности двух сигналов (с соответствующих двух обмоток ДП) на их сумму, которое может быть реализовано за время периода АЦПМ при помощи встроенного процессора нормировки<sup>120/</sup> или после ввода всех  $\sim 60$  данных АЦПМ в МЭВМ. По результатам обработки полученные таблицы распределений по тракту ЛИУ величин токов

(до 250 А) и смещений пучка ( $\pm X$ ,  $\pm Y$  мм) выводятся из МЭВМ на дисплей и печать, а также для последующего использования в АСИУ с целью контроля и проводки пучка.

В СКИМ импульсы подаются с 16 делителей напряжения ускоряющих импульсов модуляторов (ДУИ) и делителя напряжения катода электронной пушки (ДНК) по кабелям РК-75-4-11 равной длины ( $160 \pm \pm 0,1$  мм), а также с 16 датчиков тока ("пояс Роговского") эмиссии тиратронов модуляторов (ДТК). Размноженные сигналы НПИ поступают на входы 5 модулей АП-8 и коммутатор КИ-52, переключаемый с пульта КОС. Кроме того, с повторителей НПИ импульсы ДУИ следуют на входы 4 модулей ВАП-4<sup>1/2 1/</sup>. Каждый модуль обеспечивает преобразование 4 временных интервалов (от 10 до 800 нс между импульсами на входах "Стоп" и "Старт", с привязкой к началу или к концу их фронта) в амплитуды 4 сигналов с погрешностью до 0,2%, запоминаемых, как и в АП-8, на время сканирования в МСВУ, кодирования и запоминания в АЦПМ с периодом 10-20 мкс. Возможны измерения относительных задержек импульсов ДУИ, их задержек относительно импульса первого ДП или начала цикла ЛИУ (подается дополнительно задержанный импульс "Старт", например, с одного из выходов блока БЗО). По результатам обработки выводятся на экран монитора таблицы амплитуд ускоряющих импульсов (до 21 кВ) и их задержек (0-250 нс), напряжение катода пушки (до 300 кВ), токов тиратронов (до 16 кА), определяется (суммированием амплитуд ускоряющих импульсов с учетом количества индукторов в секциях) и выводится распределение энергии ускоряемых электронов по длине ускорителя (до 6-7 МэВ). Запуск систем ускорителя и синхронизация аппаратуры АСИУ осуществляется от генератора запускающих импульсов ГЗИ<sup>1/2 2/</sup>. Импульсы ГЗИ генерируются синхронно с частотой сети 50 Гц и с установленной фазой — (10-50)° относительно положительного перехода ее синусоиды через ноль, что обусловлено необходимостью синхронизации размагничивания индукторов ускорителя с сетью питания. Генератор обеспечивает режимы однократного или периодического запуска ускорителя и такие же режимы запуска с парами импульсов (перед основным импульсом формируется опережающий его на 20 мс импульс с целью сохранения амплитуды ускоряющих импульсов, уменьшения спада анодного напряжения тиратронов на частоте ниже 6 Гц). Для синхронизации подсистем АСИУ в генераторе перед основным импульсом синхронизации формируется опережающий его на 10 мс импульс (основной и опережающий импульсы синхронизации имеют отдельные выходы). Переключения частоты генератора и его режимов осуществляются вручную (с передней панели блока) или программно через магистраль КАМАК. Импульсы с выхода ГЗИ подаются в канал запуска модулятора, питающего им-

пульсный трансформатор электронной пушки, а через блок цифровой задержки БЗО (от 10 до 2720 нс, через 10 нс), множитель УР6<sup>/23/</sup>, модули задержки ПЗ типа КЛ 002 (от 0,5 до 63 нс, через 0,5 нс)<sup>/16/</sup> в каналы запуска модуляторов инжекторного и ускорительного участков. В каналах запуска модуляторов установлены блоки БУС, состоящие из разделительных и согласующих импульсных трансформаторов, усилителей импульсов и линий задержки (от 0 до 400 нс, через 20 нс), через которые на вход подмодуляторов подаются импульсы запуска тиратронов (ИЗТ). После измерений соответственно устанавливаются (через КК, вручную или программно) в модулях ПЗ и БУС (вручную) корректирующие изменения задержек. Основной и опережающий импульсы синхронизации подаются с выходов ГЗИ в модули счетчиков СЧ и регистров РС (типа КС 017 и КР 005)<sup>/18/</sup> с целью ввода номера текущего цикла ЛИУ и других данных, а также синхронизации циклов программы соответствующих подсистем. Это обеспечивает необходимую подготовку и ввод групп импульсных параметров с заданными признаками, а также идентификацию и обработку накапливаемой информации для различных циклов в подключенных МЭВМ и ЭВМ УВК (типа СМ-4). Для их информационной связи подключались стандартные каналы УВВ (платы МТТ-60, ММТ-60, SM-DK11 и SM-KS11). Синхроимпульсы подаются также на соответствующие входы 3 осциллографов КОС (с необходимой задержкой), на блоки АП-8, ВАП-4, АЦПМ и АЦПБ.

Программы АСИУ, написанные на языке MACRO-II, а также FORTRAN-IV, состоят из функциональных модулей, объединяемых в процессе компоновки. По мере развития АСИУ усложнялись создаваемые программы измерений. Например, для САФП была написана программа с выводом на экран или с распечаткой таблиц всех измеряемых токов (в однократном режиме с временем вывода около 40 с) либо одного из них по заданию оператора (вывод с периодом  $\sim 1$  с), затем с управлением источниками тока (возможно использование символов клавиатуры М, В и V — "меньше", "больше" и "ускоренное" изменение), с регистрацией и выводом формы сигналов (их графиков) на печать или цветной монитор МРФИ. Для управления работой программы используется ряд символов клавиатуры, например: R — вызов программы или возврат к диалогу, L — печать графиков, G — продолжение циклов и обновление графиков, P — вывод таблицы всех токов из БПФ и БПК, F<sub>nn</sub> и C<sub>nn</sub> — вывод в цикле тока одного (с номером nn) БПФ или БПК соответственно, H — приостановка программы, W — запись данных о режиме работы (в соответствующий файл на диске). В ходе диалога на экран выводятся и могут быть изменены данные о режиме работы (однократный либо циклический), о группе сигналов ДП (X либо Y), о выбранных номерах 6 датчиков ДП и ДТ и одного из них для настройки (цикли-

ческое обновление его формы при фиксации других 5 графиков) и др. Аналогично построенная программа СКАП позволяет в режиме диалога по указанным символам клавиатуры вызвать, остановить, продолжить или повторить измерения с первичной обработкой данных (за время ~ 70 мс), с выводом таблицы на экран (1,6 с) или на печать. Варианты программы СКИМ позволяют, наряду с периодическим обновлением таблиц параметров на экране монитора, вывести и запомнить (по запросу оператора) столбец таблицы значений сигналов ДУИ.

Проведено испытание вариантов программ автоматического изменения всех фокусирующих токов в разрешенных диапазонах и экстремального регулирования токов БПФ с целью оптимизации настройки тракта и проводки пучка по инжекторному участку. Реализован алгоритм случайного поиска с адаптирующимся шагом<sup>12,4</sup> при 30-мерном управляющем векторе. В качестве оптимизируемого функционала выбрана площадь импульса тока на выходном ДТ (по данным МРФИ). На одном из промежуточных режимов проводки при начальном значении амплитуды этого тока 53 А намеренно уменьшили это значение до 41 А с зарядом в импульсе 16 мкКл. После двух минут работы программы достигался предельный рост амплитуды тока и величины заряда до 25%. Подготовлен алгоритм симплексного метода оптимизации. Однако даже сокращенные алгоритмы этих программ с трудом размещаются в памяти МЭВМ (до 28К слов).

Представленные аппаратурно-программные средства активно использовались персоналом ЛИУ (при круглосуточном режиме работы). Использование подсистем СКАП, СКИМ, САФП с МРФИ началось соответственно с 1983, 1984, 1985 и 1987 гг. Одновременно проводились работы по расширению действующих подсистем и созданию новых. Принятая структура подсистем, разработанные и изготовленные наборы модулей позволяют последовательно наращивать число используемых каналов АСИУ. Например, для обеспечения работ на втором ускорительном участке наращиваемые группы НПИ, АП-8, ВАП-4, ПЗ, УПФ и БПФ увеличиваются соответственно на 27, 4, 3, 9, 1 и 7. Для проведения работ по управлению группой дополнительно подключенных источников импульсного питания новых фокусирующих линз в САФП введены 6 блоков УПК с ИФП и создана соответствующая модификация программы. При этом для измерения амплитуды тока (до 200 А) этих 48 источников за время ~ 1 мс применен набор модулей на основе МСВУ и АЦПМ. Проведенные работы по созданию подсистемы СЦКД на основе измерительных модулей МСВУ, МСНУ, АЦП-12, ГНП, НП<sup>11,4</sup> и других позволяют перейти от световых табло и мнемосхем (в пультовой ЛИУ) к использованию цветных мониторов с ЭВМ, а подсистемы с применением цифровой видеокамеры (на базе ПЗС-матрицы) и соответствующего



интерфейса для ввода в ЭВМ и накопления информации (до 32К байт для одного кадра) — к более точным оперативным измерениям эмиттанса и профиля пучка. При этом заметно возрастают требования к имеющимся МЭВМ и УВК (с учетом подготовки общего протокола АСИУ и сопровождающих расчетов), а также их связи по каналам УВВ. Ряд задач становится легче решаемым при замене уже устаревших МЭВМ. Осуществлен перевод подсистемы СКАП на персональную ЭВМ "Правец-16" (аналог ПЭВМ типа IBM PC/XT) с контроллером крейта КК 009<sup>1251</sup>. Основные предпосылки такого перевода: требующиеся объемы памяти и накопители для развиваемых программ диагностики и управления, возможности использования графических средств, надежность работы (с учетом износа) и оперативность ремонта, условия размещения на пульте ЛИУ, возможности коммуникации и распределения задач АСИУ на уровне современных аппаратурно-программных средств.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ананьев В.Д. и др. — ОИЯИ, 13-4395, Дубна, 1969.
2. Журавлев В.В., Замрий В.Н., Матора И.М. — В сб.: Труды VIII Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. ОИЯИ, Дубна, 1983, т. II, с.312.
3. Герасимов В.П., Ольховиков Л.В. — В сб.: Электронно-физическая аппаратура. М.: Атомиздат, 1976, вып.14, с.40.
4. Гуляев В.А., Замрий В.Н. — ОИЯИ, 13-87-734, Дубна, 1987.
5. Замрий В.Н. — ОИЯИ, 10-12041, Дубна, 1978.
6. Журавлев В.В., Замрий В.Н. — В сб.: X Международный симпозиум по ядерной электронике. Дрезден. ZfK-433, Rossendorf, 1981, с.32.
7. Замрий В.Н., Туфанов А.Е. — ОИЯИ, P10-81-347, Дубна, 1981.
8. Замрий В.Н. — В сб.: XI Международный симпозиум по ядерной электронике. ОИЯИ, Д13-84-53, Дубна, 1984, с.142.
9. Замрий В.Н., Роганов А.Б. — ОИЯИ, 13-87-160, Дубна, 1987.
10. Журавлев В.В. и др. — ОИЯИ, 13-87-633, Дубна, 1987.
11. Омельченко Б.Д. и др. — ОИЯИ, 13-80-469, Дубна, 1980.
12. Журавлев В.В., Сигаев К.П. — ОИЯИ, 13-84-309, Дубна, 1984.
13. Гуляев В.А., Замрий В.Н., Иванов В.С. — ОИЯИ, 10-11927, Дубна, 1978.
14. Замрий В.Н., Роганов А.Б. — ОИЯИ, 13-86-106, Дубна, 1986.
15. Гуляев В.А., Замрий В.Н., Иванов В.С. — ОИЯИ, 10-11940, Дубна, 1978.
16. Антюхов В.А. и др. ОИЯИ, 10-80-650, Дубна, 1980.
17. Журавлев В.В., Замрий В.Н. — ОИЯИ, 13-83-435, Дубна, 1983.
18. Вьонг Дао Ви и др. — ОИЯИ, 10-81-755, Дубна, 1981.
19. Замрий В.Н. и др. — ОИЯИ, 13-86-538, Дубна, 1986.
20. Замрий В.Н. — В сб.: XII Международный симпозиум по ядерной электронике. ОИЯИ, Д13-85-793, Дубна, 1985, с.240.

21. Замрий В.Н., Самойлов А.К. — ОИЯИ, 13-85-587, Дубна, 1985.
22. Журавлев В.В., Самойлов А.К. — ОИЯИ, Б1,13-85-875, Дубна, 1985.
23. Басиладзе С.Г., Нгуэн Тхи Ша — ОИЯИ, 13-11783, Дубна, 1978.
24. Васильев Н.Д. и др. — В сб.: Труды IV Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Москва, 1974, т. II, с.191.
25. Георгиев А., Чуринов И.Н. — ОИЯИ, Р10-88-381, Дубна, 1988.

Рукопись поступила в издательский отдел  
17 января 1990 года.