

11-58

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

9 - 11959

ПОПОВ  
Вадим Александрович

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ  
И РАЗРАБОТКА НЕКОТОРЫХ ВЧ-СИСТЕМ  
ИНЖЕКЦИОННОГО КОМПЛЕКСА ЛУ-20  
СИНХРОФАЗОТРОНА ОИЯИ

Специальность: 05.09.04 -  
электрофизические установки и ускорители

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Дубна 1978

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий  
Объединенного института ядерных исследований.

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук  
старший научный сотрудник  
СЕМЕНЮШКИН Игорь Николаевич.

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук  
старший научный сотрудник  
САРАНЦЕВ Владислав Павлович  
(Объединенный институт ядерных  
исследований, ОИЯИ),  
кандидат технических наук  
младший научный сотрудник  
ТИШИН Валерий Георгиевич  
(Институт физики высоких энергий,  
г. Серпухов).

Ведущее предприятие: Институт теоретической и  
экспериментальной физики, г. Москва.

Защита диссертации состоится " \_\_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 197 года  
в \_\_\_\_\_ часов на заседании специализированного совета  
Д-047.01.02 при Лаборатории высоких энергий Объединенного  
института ядерных исследований.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ЛВЭ ОИЯИ.

Автореферат разослан " \_\_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 1978 года

Ученый секретарь  
специализированного совета  Лихачев М.Ф.

АКТУАЛЬНОСТЬ ПРОБЛЕМЫ. Со времени запуска синхрофазотрона  
ОИЯИ на 10 ГэВ введены в строй более совершенные протонные синхро-  
троны в нашей стране (ИВЭ) и за рубежом (FNAL и др.). Системати-  
ческое повышение интенсивности ускоренных частиц – одна из самых  
актуальных задач, решение которой может обеспечить высокий уровень  
проведения физических экспериментов. В этих условиях требуемый  
уровень для проведения физических экспериментов можно обеспечить  
лишь при постоянном улучшении параметров синхрофазотрона. Особое  
место занимает здесь повышение интенсивности протонного пучка.

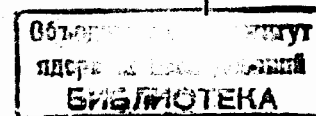
Ускорение на синхрофазотроне дейтерия положило в ОИЯИ нача-  
ло новому научному направлению – релятивистской ядерной физике.  
Однако получение пучков ускоренных ядер углерода, кислорода стало  
реальным лишь после запуска нового инжектора синхрофазотрона –  
протонного линейного ускорителя на 20 МэВ – ЛУ-20. В этом случае  
при ускорении ядер легких элементов на второй кратности дрейфа  
энергия инжектируемых частиц возросла с 2,25 до 5 МэВ/нуклон. Од-  
нако специфика ускорения ядер легких элементов в линейном протон-  
ном ускорителе ограничивала их интенсивность. Для получения мак-  
симальной интенсивности ускоренных частиц необходимо было деталь-  
но изучить и тщательно согласовать пучки протонов и ядер легких  
элементов на входе ЛУ-20, а также на входе синхрофазотрона.

СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА. В опубликованных до настоящего времени  
работах, посвященных высокочастотному (ВЧ) возбуждению резонатора  
и повышению интенсивности ускоренных частиц, отражено мало проб-  
лем, встретившихся при разработке и наладке ВЧ-устройств ЛУ-20 и  
согласовании пучка протонов и ядер в линейном ускорителе.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ. Целью настоящей диссертации является обобщение  
результатов работы по ВЧ-возбуждению резонатора, по увеличению  
надежности ВЧ-генераторов, работающих в составе ЛУ-20, по согла-  
сованию пучка протонов и ядер легких элементов на входе ЛУ-20 и  
согласованию пучка на входе синхрофазотрона, приведшей к значи-  
тельному повышению интенсивности частиц.

НАУЧНАЯ НОВИЗНА.

I. ВЧ-возбуждение резонатора проведено способом, ранее не  
встречавшимся на ЛУ. При использовании автогенератора с положи-  
тельной обратной связью через резонатор применена схема с задаю-



щим генератором для подавления резонансного высокочастотного разряда (РВР). Частота задающего генератора выше частоты резонатора на  $\Delta f \sim 100$  кГц при частоте резонатора  $f_p = 145,0$  МГц и добротности  $Q = (35+40) \cdot 10^3$ .

2. Также для подавления РВР применена дополнительная система обратной связи с усилителем, обеспечивающая необходимую крутизну нарастания ВЧ-напряжения в резонаторе на уровне  $U_{РВР} \sim 0,1$  Усила.

3. Для увеличения надежности работы ЛУ-20 использованы две петли и мост сложения в цепи положительной обратной связи автогенератора, обеспечивающие защиту установки по высокой частоте от перенапряжений при пробоях в резонаторе, а также позволяющие более устойчиво возбудить резонатор на нужном типе колебания ( $TM_{010}$ ).

4. Система из двух петель и моста сложения применена для защиты ВЧ-генераторов по анодному напряжению при пробоях в резонаторе.

5. Согласование пучка ядер легких элементов на входе протонного линейного ускорителя осуществлено инжекцией ядер в шестой ускоряющий зазор.

#### ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗНАЧЕНИЕ.

1. На основе предложений, изложенных в диссертации, были разработаны и изготовлены ВЧ-устройства, которые эксплуатируются в составе инжекционного комплекса ЛУ-20, являющегося инжектором синхрофазотрона ОЯИ. Результаты экспериментальных данных хорошо согласуются с расчетными параметрами и подтверждают правильность расчетов и решений, изложенных в диссертации.

2. Эти результаты могут быть использованы при проектировании новых ускорителей и при модернизации действующих.

АПРОБАЦИЯ РАБОТЫ. Опубликованные работы, на основании которых написана диссертация, докладывались и обсуждались на семинарах отделов, обслуживающих ускоритель ЛВЭ.

ПУБЛИКАЦИИ. По результатам выполненных исследований опубликовано 8 работ и получено одно авторское свидетельство.

ОБЪЕМ РАБОТЫ. Диссертационная работа изложена на 70 страницах машинописного текста, иллюстрирована 38 рисунками, состоит из введения, 4 глав, заключения и списка цитируемой литературы из 49 наименований на 5 страницах.

#### СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ.

Во введении дана общая постановка задачи повышения интенсивности, намечены пути решения главной проблемы и кратко изложены результаты исследований и решений.

В первой главе приведен краткий обзор методов борьбы с резонансным высокочастотным разрядом (РВР), который представляет значительные трудности при ВЧ-возбуждении резонаторов, находящихся в вакууме  $\sim 10^{-6}$  Тор, особенно, если вакуумный объем откачивается масляными высоковакуумными насосами. В однорезонаторном ЛУ применение автогенератора с обратной связью через резонатор является предпочтительным. На ЛУ-20 применен трехкаскадный генератор с обратной связью через резонатор. Для подавления РВР предложен, исследован и внедрен метод с применением задающего генератора, частота которого выше частоты резонатора на  $\Delta f \sim 100$  кГц при частоте резонатора  $f_p = 145,0$  МГц и добротности  $Q = (35+40) \cdot 10^3$ . Это позволило обеспечить своевременный запуск ЛУ-20 и получить расчетные параметры ускоренных частиц на входе синхрофазотрона /1/.

При тренировке резонатора после вскрытия вакуумного объема ЛУ или после перерывов в работе возникают пробои ВЧ-напряжения в резонаторе, которые вызывают перенапряжения в генераторе, фидере, элементах связи и т.д. Для повышения надежности работы ВЧ-генераторов была предложена, разработана и внедрена система положительной обратной связи, состоящая из двух петель в резонаторе и моста сложения мощностей /2,3/. Эта схема позволяет устойчиво возбудить резонатор на основной моде  $TM_{010}$ . Такая система также обеспечивает быстрое действие защиты при пробоях в резонаторе. Время срабатывания защиты определяется прохождением сигнала по цепям положительной обратной связи и составляет (для ЛУ-20) не более  $\sim 0,4$  мкс. Подобная же система, использующая разностный сигнал с моста сложения, применена для снятия анодного напряжения с ВЧ-генератора при пробоях в резонаторе, т.к. анодное напряжение на ВЧ-генераторе без ВЧ-сигнала (если условия самовозбуждения нарушаются) может вызвать СВЧ-генерацию мощных радиоламп.

ВЧ-генератор отдает в резонатор ЛУ-20 около 3 МВт мощности, при этом ток протонов равен 15 мА. Работа ВЧ-генератора в предельном режиме вызывала пробои в мощных радиолампах, модуляторе и т.д. Для увеличения надежности работы ЛУ-20 и синхрофазотрона

в целом проведено сложение ВЧ-мощностей двух генераторов (второй генератор резервный) в резонаторе ЛУ-20. На рис. I приведена блок-схема сложения мощностей, где обозначены: УСИ и УСИ - усилители мощности; мост слож. - мост сложения мощностей; мост целен. - мост деления мощностей; УП - усилитель предварительный; Н - нагрузка 75 Ом; ФВ - фазовращатель.

В диссертации проводится сравнение методов сложения мощностей. ВЧ-мощность суммируется в резонаторе ЛУ-20. Элементы системы сложения были смонтированы во время профилактических остановок ускорителя. Это позволило получить в резонаторе около 4,5+5,0 МВт и повысить ток пучка протонов на выходе ЛУ-20 до 25 мА. Сложение ВЧ-мощностей также позволяет полнее использовать ресурс мощных радиоламп, отработавших срок службы и потерявших номинальные параметры [4].

Для подавления РВР на ЛУ-20 более надежной в эксплуатации оказалась схема с дополнительной обратной связью (ДОС). На автогенераторе включено две цепи положительной обратной связи. Основное кольцо ПОС охватывает три каскада усилителя мощности. Система ДОС, включающая еще трехкаскадный предварительный усилитель, обеспечивает необходимый фронт нарастания ВЧ-напряжения в резонаторе на уровне  $U_{РВР} \approx 0,1 U_{ном}$ . При этом напряжение с петли в резонаторе должно быть раз в 10+20 больше того напряжения, которое необходимо на входе усилителя в установившемся режиме. Когда  $U_{РВР}$  пройден, анодное напряжение с предварительного усилителя снимается и ДОС выключается. В ЛУ-20 РВР развивается, в основном, в первых ускоряющих зазорах, поэтому петля ДОС установлена в конце резонатора.

Глава 2 посвящена вопросам согласования пучка частиц из форинжектора со входом ЛУ-20.

При ускорении ядер легких элементов с отношением заряда к массе  $z/m = 1/2$  на второй кратности дрейфа в протонном линейном ускорителе скорость ядер должна быть равна  $v_{др} = v_{пуч}/2$ . Для этого напряжение на форинжекторе уменьшалось вдвое, что ухудшало характеристики пучка ядер и его интенсивность. Инжекция ядер в шестой ускоряющий зазор позволила работать при номинальном напряжении на форинжекторе. Это достигнуто установкой металлической перегородки в начальной части резонатора на пятой трубке дрейфа. В малом отсеке резонатора ВЧ-поле отсутствует. Квадру-

польные линзы первых трубок дрейфа обеспечивают транспортировку пучка ядер в шестой ускоряющий зазор. Проведенная модернизация начальной части резонатора ЛУ-20 позволила увеличить интенсивность дейтерия в 3 раза,  $\alpha$ -частиц в 5 раз [5]. При переходе на ускорение протонов требуется снимать металлическую перегородку. Запитка отсека резонатора ВЧ-мощностью, чтобы уровень и фаза ВЧ-напряжения соответствовали условию, когда перегородка отсутствует, позволит осуществлять оперативный переход ускорения с ядер на протоны.

Для продольной группировки частиц был рассчитан, сконструирован и изготовлен группирователь клистронного типа [6]. Захват частиц из источника в сепаратрису возрос с 25+30% до 50+60%. Группировка частиц определяется двумя основными параметрами: расстоянием от группирователя до первого ускоряющего зазора и эффективной амплитудой напряжения на зазоре группирователя. По конструктивным особенностям параметры группировки близки к оптимальным при ускорении протонов и неоптимальны при ускорении ядер легких элементов. Расположение группирователя выбрано в таком месте ионопровода, где пучок имеет диаметр 100 мм. Расчеты показали, что фактор времени пролета на оси группирователя равен 0,1, а на краю апертуры 0,9. Коэффициент группировки весьма неодинаков на площади апертур: на оси = 1,27, а на краю апертуры = 2,54. Для увеличения фактора времени пролета на оси апертуры установлены сетки в пролетном отверстии. Прозрачность сеток равна 0,99. Группирователь увеличил интенсивность ускоряемых частиц в два раза. На выходе ЛУ-20 достигнута интенсивность пучков

протонов 50 мА,  
дейтронов 10 мА,  
 $\alpha$ -частиц 1 мА

при длительности импульса тока ~ 600 мкс.

Глава 3 посвящена вопросу согласования пучка частиц на входе синхрофазотрона [7,8]. Размеры вакуумной камеры синхрофазотрона позволяют проводить многооборотную инжекцию частиц в квазибетатронном режиме. При захвате в синхротронный режим и при дальнейшем ускорении потери частиц во многом определяются также энергетическим спектром пучка. Для обеспечения минимума потерь в синхротронном режиме необходимо создать такие условия инжекции пучка в камеру, при которых его бетатронные колебания были бы



минимальными. Такой режим инжекции обеспечивается при увеличении энергии частиц на входе синхрофазотрона соответственно росту его магнитного поля с одновременным уменьшением мгновенного энергетического разброса пучка.

Показано расчетом и экспериментально подтверждено, что инжекция в синхрофазотрон на орбиту, отстоящую от инфлектора на расстоянии 100+200 мм, дает максимальный захват в квазибетатронный режим. Максимальный захват в синхротронный режим осуществляется для частиц, бетатронные колебания которых составляют 100+150 мм. Устройством, уменьшающим спектр энергий частиц в сгустке и модулирующим энергию частиц за время инжекции, является выравниватель и модулятор энергии (разгруппирователь). Возможно совмещение этих функций в одном устройстве. Основным узлом разгруппирователя является резонатор. Резонатор расположен на расстоянии 9 м от выхода ЛУ-20. Амплитуда и фаза ВЧ-напряжения подбираются такими, чтобы приращения энергии частиц уменьшали энергетический спектр пучка. Изменяя фазу ВЧ-напряжения в резонаторе, получим увеличение средней энергии пучка за время инжекции. На рис. 2 изображен процесс одновременного выравнивания спектра и модуляции энергии для протонных сгустков с начальным разбросом импульсов  $\Delta P/P = \pm 0,4\%$ .

Амплитуда напряжения на щели резонатора 300 кВ, фаза напряжения изменяется от  $-60^\circ$  до  $+60^\circ$ . Разгруппирователь с совмещенными функциями обладает недостатками: при ускорении ядер легких элементов на ЛУ-20 выравнивание и модуляция энергии частиц осуществляется тем же резонатором. Такой режим инжекции в синхрофазотрон позволяет увеличить интенсивность пучка частиц в 2+3 раза (по сравнению с режимом без модуляции энергии за время инжекции и выравнивания энергии частиц в сгустке).

Расчет показывает, что дальнейшее увеличение эффективности инжекции протонов и ядер легких элементов возможно при использовании системы, состоящей из трех резонаторов. Первый резонатор, расположенный непосредственно на выходе ЛУ, должен осуществлять модуляцию энергии путем изменения фазы напряжения на его щели. Второй резонатор, расположенный на расстоянии 9 м, будет сужать разброс по импульсам ядер легких элементов. Третий резонатор, отстоящий на 15 м, будет сужать разброс по импульсам для протонов. При использовании такой системы эффективность инжекции

протонов возрастет на 30+50%, а ядер легких элементов - примерно в 2 раза.

ВЧ-устройства вместе с коррекцией магнитного поля ускорителя позволили получить на синхрофазотроне ОИЯИ следующие интенсивности:

протонов	- $4 \cdot 10^{12}$	в цикле
дейтронов	- $3 \cdot 10^{11}$	"
$\alpha$ -частиц	- $2 \cdot 10^{10}$	"
углерода	- $2 \cdot 10^6$	"

В IV главе приводится описание ВЧ-устройств ЛУ-20, в создании и наладке которых автор принимал непосредственное участие.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты проведенной работы можно кратко сформулировать следующим образом:

1. Опробован и внедрен метод подавления резонансного высокочастотного разряда в резонаторе ЛУ-20 по схеме с дополнительным задающим генератором, частота которого больше на 100 кГц частоты резонатора. Благодаря этому в резонаторе ЛУ-20 введена ВЧ-мощность и получен требуемый по параметрам пучок ускоренных частиц.

2. Разработана система защиты ВЧ-генераторов по высокой частоте при пробоях в резонаторе, состоящая из двух петель и моста сложения положительной обратной связи. Быстродействие разработанной системы защиты определяется прохождением сигнала по цепям обратной связи и составляет  $\sim 0,4$  мкс. Такая же система применена для защиты ВЧ-генераторов по анодному напряжению при пробоях в резонаторе. Внедрение системы защиты позволило устойчиво возбудить резонатор на основном колебании  $T_{m010}$ , повысило надежность работы ВЧ-генераторов и ускорителя в целом.

3. Проведено сложение ВЧ-мощностей двух генераторов, что увеличило ВЧ-мощность в резонаторе ЛУ-20 до 4,5+5 МВт. Ток пучка протонов возрос до 50 мА. Сложение ВЧ-мощностей при длительности импульса 1000 мкс обеспечило более легкий режим работы ВЧ-генераторов, увеличило надежность работы ЛУ-20.

4. Разработана и внедрена система дополнительной обратной связи для подавления РВР. На автогенераторе включены две системы положительной обратной связи. Дополнительная система обратной связи обеспечивает необходимую крутизну фронта нарастания ВЧ-

напряжения на уровне  $U_{РВР} = 0,1 U_{НОМ}$ . Такая система является более надежной в эксплуатации ускорителя.

5. Предложена, разработана и осуществлена инжекция ядер в шестой ускоряющий зазор протонного линейного ускорителя. Для этого на пятой трубке дрейфа установлена медная перегородка, отделяющая малый отсек от остальной части резонатора ЛУ-20. Такая модернизация начальной части протонного линейного ускорителя ЛУ-20 позволила при ускорении ядер с отношением заряда к массе  $z/m = 1/2$  обеспечить работу форинжектора при номинальном напряжении. Интенсивность пучка дейтронов возросла в 3 раза, интенсивность  $\alpha$ -частиц - в 5 раз.

6. Рассчитан, разработан и введен в строй группирователь частиц для согласования пучка со входом ЛУ-20. Проведен расчет коэффициента группировки при апертуре 100 мм. Для увеличения захвата частиц в сепаратрису установлены сетки в пролетном отверстии. Группирователь обеспечил увеличение интенсивности пучка частиц на выходе ЛУ-20 в два раза.

7. Выполнен расчет условий инжекции частиц в синхрофазотрон при модуляции их энергии. Рассчитана эффективность инжекции с учетом реальных параметров пучка линейного ускорителя ЛУ-20. Оценена необходимая точность модуляции энергии частиц. Проведено сравнение эффективности захвата в квазибетатронный режим без модуляции и с модуляцией энергии, когда модуляция осуществляется совмещенным разгруппирователем-модулятором и раздельными устройствами.

8. Разработан, изготовлен и введен в строй разгруппирователь с модуляцией энергии частиц для согласования пучка на входе синхрофазотрона, который:

- а) уменьшает разброс энергий частиц в ступке в 3+4 раза;
- б) осуществляет модуляцию энергии частиц за время инжекции в соответствии с ростом магнитного поля синхрофазотрона. Модуляция энергии частиц за время инжекции обеспечивает заполнение камеры ускорителя максимальным количеством частиц. При этом амплитуды бетатронных колебаний частиц не превышают 20+25 см. Соблюдение этого условия обеспечивает минимальные потери частиц в синхротронном режиме. Интенсивность ускоренных частиц при работе разгруппирователя с модуляцией энергии возросла в 2+3 раза.

Вышеизложенные результаты работы использованы при запуске линейного ускорителя ЛУ-20, при работе ЛУ-20 на синхрофазотрон.

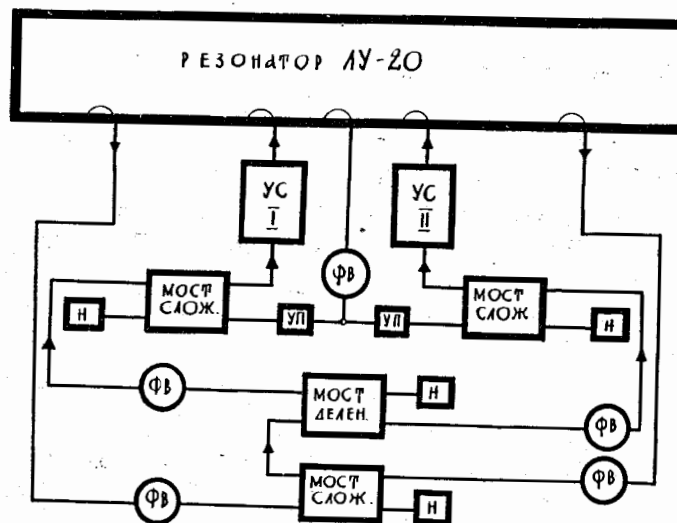


Рис. 1. Блок-схема защиты и сложения мощностей двух ВЧ генераторов.

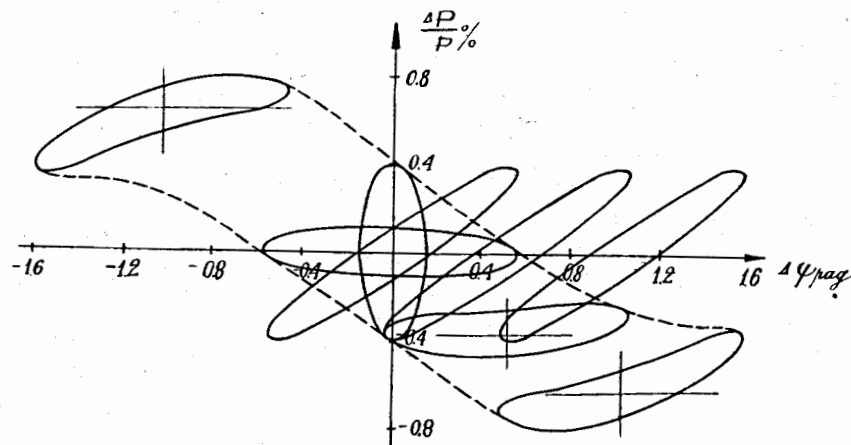


Рис. 2. Процесс одновременного выравнивания спектра и модуляции энергии для протонных ступков с начальным разбросом импульсов  $\Delta P/P = \pm 0,4\%$ .

Материалы диссертации докладывались на семинарах отделов ускорителя ЛВЭ ОИИИ и опубликованы в работах:

1. В.А.Попов. Возбуждение резонатора линейного ускорителя ЛУ-20 ЛВЭ ОИИИ. Сообщение ОИИИ, 9-9061, Дубна, 1975.
2. В.А.Попов. Положительная обратная связь ВЧ-системы линейного ускорителя ЛУ-20 ЛВЭ ОИИИ. Сообщение ОИИИ, 9-9192, Дубна, 1975.
3. В.А.Попов. Устройство возбуждения резонатора линейного ускорителя ионов. Авторское свидетельство № 536628, Бюлл. 43, 25.II.76.
4. В.А.Попов. Система возбуждения резонатора ЛУ-20 синхрофазотрона ОИИИ. Сообщение ОИИИ, 9-II835, Дубна, 1978.
5. Ю.Д.Безногих, Л.П.Зиновьев, И.И.Карпов, В.А.Мончинский, В.А.Попов. О повышении интенсивности ускоренных пучков ядер в протонных линейных ускорителях. Сообщение ОИИИ, 9-9592, Дубна, 1976.
6. Ю.Д.Безногих, ..., В.А.Попов, ... Синхрофазотрон ОИИИ. Работа и совершенствование (I квартал 1978г.). Сообщение ОИИИ, 9-II765, 1978.
7. Ю.Д.Безногих, ..., В.А.Попов, ... Дебанчер инжектора синхрофазотрона ОИИИ с модуляцией энергии ускоренного пучка. Сообщение ОИИИ, P9-5956, Дубна, 1971, ПТЭ, № I, 1972.
8. Р.Б.Кадыров, В.А.Попов, В.Л.Степанук. Инжекция частиц в синхрофазотрон с выравниванием и модуляцией энергии. Сообщение ОИИИ, 9-III88, Дубна, 1978.
9. Ю.Д.Безногих, А.Г.Бонч-Осмоловский, М.А.Воеводин, Л.П.Зиновьев, В.А.Мончинский, В.А.Попов, И.Н.Семенюшкин, А.П.Щаренков. Экспериментальные результаты по повышению интенсивности ускоряемых пучков в синхрофазотроне ОИИИ за 1977-78г. и их анализ. Сообщение ОИИИ, P9-II903, Дубна, 1978.

Рукопись поступила в издательский отдел  
16 октября 1978 года.