= ТЕХНИКА ЯДЕРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА =

УДК 539.1.076+539.121.8

СИСТЕМА ВОЗБУЖДЕНИЯ КОГЕРЕНТНЫХ КОЛЕБАНИЙ ЧАСТИЦ На коллайдере вэпп-4м

© 2019 г. О. В. Анчугов^{*a*}, А. Н. Журавлев^{*a*}, С. Е. Карнаев^{*a*}, В. А. Киселёв^{*a*}, П. А. Пиминов^{*a*}, Д. А. Шведов^{*a*,*}

^а Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН Россия, 630090, Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 11 *e-mail:D.A. Shvedov@inp.nsk.su, shvedda@mail.ru Поступила в редакцию 27.02.2019 г.

После доработки 27.02.2019 г. Принята к публикации 24.03.2019 г.

Для исследования динамики пучков на электрон-позитронном коллайдере ВЭПП-4М создана система возбуждения когерентных колебаний сгустка частиц, состоящая из импульсного генератора, устройства отклонения пучка (кикера), системы управления и синхронизации. Система имеет два независимых канала для возбуждения горизонтальных и вертикальных колебаний и позволяет возбуждать колебания у заданного сгустка пучка частиц. Для наблюдений колебаний пучка используется система измерения положения пучка в пооборотном режиме, а также быстрый многоканальный фотоэлектронный умножитель (профилометр). Описана конструкция и приведены результаты работы высоковольтных наносекундных генераторов удара с длительностью импульса тока по основанию 200–250 нс, напряжением до 25 кВ и током до 2 кА. С помошью конструктивных решений были уменьшены длительности фронтов выходных импульсов, что позволило избежать возбуждения соседних сгустков. При испытании генераторов на рабочие нагрузки были получены следующие результаты: фронт импульса горизонтального удара 30 нс и вертикального удара — 50 нс, длительность вершины импульса горизонтального удара ~20 нс, максимальная амплитуда импульса 25 кВ и нестабильность по времени (джиттер) ± 1 нс. Представлены результаты измерений параметров пучка, полученных с использованием данной системы.

DOI: 10.1134/S0032816219050021

введение

Коллайдер ВЭПП-4М [1] входит в состав уникальной научной установки – "Комплекса электрон-позитронных коллайдеров ВЭПП-4— ВЭПП-2000" и предназначен для проведения экспериментов по физике высоких энергий с детектором КЕДР [2] (режим коллайдера), экспериментов с выведенными пучками синхротронного излучения [3] (режим источника синхротронного излучения (с.и.)), экспериментов с выведенными пучками жестких γ-квантов [4] (режим выведенного пучка), а также экспериментов по физике ускорителей [5–7].

На рис. 1 представлена схема комплекса ВЭПП-4. Пучки электронов и позитронов с энергией 400 МэВ поставляются с инжекционного комплекса [8] (не представлен на схеме) и инжектируются в накопитель ВЭПП-3, который ускоряет частицы до энергии инжекции в ВЭПП-4М (до 1.9 ГэВ).

Коллайдер ВЭПП-4М состоит из прямолинейного технического промежутка, экспериментального промежутка и двух полуколец. В техническом промежутке размещаются 5 в.ч.-резонаторов и система электростатического разведения пучков, а также осуществляется инжекция пучков. В экспериментальном промежутке расположены универсальный магнитный детектор КЕДР и система регистрации рассеянных электронов на основе магнитного спектрометра. Из места встречи возможен вывод γ-квантов в специальный экспериментальный зал.

Полукольца состоят из элементов периодичности на основе FODO-ячеек с совмещенными функциями. В середине каждого полукольца 4 элемента периодичности заменены вставками с отдельными дипольными и квадрупольными магнитами, что составляет эквивалент замененным FODOячейкам, в которых размещается система электростатического разведения. В вставке одного из полуколец установлен многополюсный магнитвигглер для генерации синхротронного излучения и организован вывод пучков с.и. в специальный экспериментальный зал.



Рис. 1. Комплекс ВЭПП-4.

В.ч.-система коллайдера работает на частоте 180 МГц, что соответствует 222-й гармонике частоты обращения. В кольце коллайдера одновременно возможна циркуляция 2 электронных и 2 позитронных сгустков или 16 сгустков частиц одной полярности.

Основные параметры коллайдера ВЭПП-4М. Периметр 366 мм; энергия 1–5 ГэВ; бетатронные частоты 8.54/7.58; натуральный хроматизм –14/–20; эмиттанс 20 нм·рад; разброс энергий 4 · 10⁻⁴; длина сгустка 6 см.

Для измерения параметров пучка на ВЭПП-4М разработана система возбуждения когерентных бетатронных колебаний одного из циркули-



Рис. 2. Условная схема питания пластин кикеров ВЭПП-4М.

рующих сгустков, состоящая из двух независимых каналов, действующих по горизонтали (X) и по вертикали (Y). Каждый из каналов состоит из импульсного генератора, кикера, подключенного к генератору посредством кабельной линии, системы управления и синхронизации.

Возбуждение бетатронных колебаний сгустка частиц в коллайдере осуществляется импульсным магнитным полем, которое создается в кикере, состоящем из пары токоведущих пластин, расположенных внутри вакуумной камеры кольца коллайдера, на которые подаются импульсы тока, текущего по пластинам в противоположных направлениях. Соответственно, поля от каждой пластины в апертуре кикеров суммируются. Данная схема коммутации позволяет возбуждать колебания пучка как электронных, так и позитронных сгустков, движущихся в коллайдере во встречных направлениях. Условная схема питания пластин кикеров показана на рис. 2.

Кикеры горизонтального и вертикального ударов размещаются в техническом промежутке ВЭПП-4М.

Система управления позволяет регулировать амплитуду напряжения на генераторе и тем самым контролировать амплитуду возбуждаемых бетатронных колебаний. Удар совершается по одному заданному сгустку частиц. Положение пучка после нанесения удара пооборотно регистрируется с помощью системы пикап-электродов, состоящей из 54 датчиков, каждый из которых имеет свой кон-



Рис. 3. Силовые линии в центральном сечении кикера и распределение поля в выделенной зоне *АБ* (показана стрелками).

троллер для аналого-цифровой обработки сигнала [9, 10].

С помощью системы возбуждения колебаний на ВЭПП-4М доступен широкий спектр различного рода измерений [5–7]: измерения параметров линейной оптики коллайдера (частоты, амплитуды и фазы бетатронных колебаний, бетатронной функции, хроматизма частот и β -функций), нелинейной оптики (зависимости частот колебаний от амплитуд, размер динамической апертуры), измерения декрементов затухания, исследования коллективных эффектов (зависимость частот бетатронных колебаний от тока сгустка) и т.д. Данная система также используется для управляемого уменьшения тока отдельного сгустка, вплоть до полного его выбивания.

СИСТЕМА ГОРИЗОНТАЛЬНОГО УДАРА

Пластины кикера горизонтального удара располагаются вдоль орбиты пучка перпендикулярно к его медианной плоскости. В момент прохождения импульса тока вертикальное магнитное поле создает горизонтальную силу, воздействующую на частицу. На рис. 3 показано распределение поля между пластинами кикера.

Основные параметры кикера горизонтального удара. Максимальный угол отклонения пучка 1.8. мрад; максимальная амплитуда поля 33 Гс; максимальный ток в пластинах кикера 1 кА; рабочая апертура кикера 80 × 60 мм; длина пластин 1.8 м.

Кикер горизонтального удара размещается вблизи одного из мест встречи электронных и позитронных сгустков. В этом месте имеется три пары пластин электростатического горизонтального разведения встречных пучков. Для осуществления разведения сгустков оказалось достаточно одной пары пластин, расположенной посередине. Две пары крайних пластин было решено использовать для горизонтального удара, соединив их последовательно кабелями. При этом обеспечиваются необходимые интеграл поля и симметричность воздействия на пучки.

Для создания импульсов тока в кикере был разработан специальный тиратронный генератор, схема которого приведена на рис. 4.

Основные параметры генератора горизонтального удара. Максимальный выходной ток генератора 2 кА; выходное сопротивление 12.5 Ом; максимальная амплитуда напряжения 25 кВ; длительность импульса по основанию 250 нс; джиттер ± 1 нс; амплитудная нестабильность вершины импульса 0.1%; длина каждой пары пластин 1.2 м.

Генератор состоит из импульсного источника питания с напряжением до 0.7 кВ, повышающего высоковольтного трансформатора, накопитель-



Рис. 4. Схема генератора горизонтального удара пучка ВЭПП-4М. $\mathcal{Д}\Phi\mathcal{J}$ – двойная формирующая линия, K_1 , K_2 – кабельные линии, Π_1 , Π_2 – перемычки, $\Pi P_1 - \Pi P_3$ – пластины разведения; R_3 , R_{μ} , R_{μ} – зарядный резистор, резистор делителя и резистор шунта; ГИМН-0.1 – импульсный источник питания.

ПРИБОРЫ И ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА № 5 2019

Рис. 5. Осциллограмма импульса на пластинах кикера горизонтальной удара пучка ВЭПП-4М.

ной формирующей линии [11] и высоковольтного коммутатора — водородного тиратрона с накаливаемым катодом ТГИ1-1000/25. Была выбрана схема генератора с $\mathcal{Д}\Phi\mathcal{J}$ на дискретных элементах, в которой амплитуда выходного импульса равна зарядному напряжению. Линия заряжается через зарядное сопротивление от высоковольтного повышающего трансформатора. При срабатывании коммутатора, который запускается от системы синхронизации, линия разряжается через кабельные линии K_1 и K_2 , каждая из которых состоит из двух кабелей РК50-17-17, на нагрузки $R_{\rm H} = 12.5$ Ом, и в пластинах кикера (ΠP_1 и ΠP_3) возникает импульс тока.

Чтобы обеспечить необходимую амплитуду удара во всем диапазоне энергий ВЭПП-4М, генератор должен создавать выходное напряжение от 1 до 25 кВ. С учетом времени установления поля в кикере из двух последовательно соединенных пар пластин минимальная длительность плоской части импульса была задана 50 нс. Для обеспечения необходимой амплитуды тока в кикере при определенном рабочем напряжении выходное сопротивление генератора составляет величину 12.5 Ом. Для обеспечения формы импульса, максимально близкой к прямоугольной, секции формирующей линии выполнены с максимально возможным количеством ячеек. Оптимальной получилась конструкция из 24-х ячеек с индуктивностью 37.5 нГн и емкостью 240 пФ. Тиратрон ТГИ1-1000/25 обеспечивает надежную круглосуточную работу системы [12, 13].

На рис. 5 показана осциллограмма импульса с шунта ($R_{\rm m}$). С целью улучшения формы вершины импульса тока в пластинах была проведена коррекция емкостей первой ячейки формирующей линии [14].

Благодаря этой коррекции, компактности конструкции, а также относительно большому количеству ячеек формирующей линии форма импульса тока в пластинах, регистрируемого на шунте, оказалась вполне удовлетворительной (см. рис. 5). Общий вид генератора и выходной кабельный вывод показаны на рис. 6.

Особое внимание было уделено конструкции соелинений межлу элементами генератора. Следовало минимизировать длину проводников между тиратроном, формирующей линией и выходными кабелями. При этом генератор должен работать при достаточно высоких зарядном и выходном напряжениях в условиях длительной эксплуатации. Для минимизации искажения формы импульса в качестве согласующей нагрузки использованы проволочные сопротивления с цилиндрической малоиндуктивной обмоткой [15]. Контрольный шунт выполнен из 10 резисторов ТВО-0.25, расположенных "звездой" непосредственно на вакуумном вводе пластины. Такая конструкция за счет малой индуктивности обеспечивает максимальную достоверность формы контрольного импульса тока.

СИСТЕМА ВЕРТИКАЛЬНОГО УДАРА

Для возбуждения вертикальных бетатронных колебаний сгустка частиц используется инфлектор – импульсное устройство для впуска частиц из накопителя ВЭПП-3 в коллайдер ВЭПП-4М. Инфлектор представляет собой отрезок короткозамкнутой линии (см. рис. 2), выполненной в виде пластин длиной 1200 мм, которые отклоняют частицы магнитным полем. В отличие от пластин для горизонтального удара, пластины инфлектора распложены внутри вакуумной камеры параллельно медианной плоскости пучка. Соответственно, между пластинами создается горизонтальное магнитное поле и вертикальная сила воздействия на частицы. Так как в ВЭПП-4М пучки позитронов и электронов инжектируются в противоположных направлениях, система впуска состоит из двух независимых инфлекторов для электронов и позитронов, каждый из которых питается от индивидуального генератора. В качестве кикера удара для возбуждения вертикальных колебаний используется тот инфлектор, который не используется системой впуска в данный момент (позитронный при перепуске электронов, и наоборот).

Основные параметры инфлектора ВЭПП-4М. Максимальный угол отклонения пучка в режиме удара 1.5 мрад; максимальная индукция поля 43 Гс; максимальный ток в пластинах кикера в режиме удара 400 А; рабочая апертура кикера 30 мм; длина пластин 1.2 м.

Структура поля, действующего в инфлекторе, показана на рис. 7. Каждый инфлектор состоит из





Рис. 6. Основные элементы генератора в установочном шкафу: слева — пластины формирующих линий, справа — разделка выходных кабелей.



Рис. 7. Силовые линии в центральном сечении кикера и распределение поля в выделенной зоне АБ.

двух одинаковых тиратронных генераторов, подключенных каждый к своей пластине. Как и в генераторе горизонтального удара, в генераторе, питающем инфлектор, в качестве накопителя работает $\mathcal{Д}\Phi\mathcal{Л}$ на дискретных элементах. При разряде формирующей линии импульс через соединительные кабели *K*, каждый из которых фактически состоит из четырех РК50-17-17, подается на нагрузку $R_{\rm H}$, которая согласует кикер с генератором и уменьшает импульсные отражения от пластин. Нагрузка располагается в корпусе ввода и подключена к пластине в вакуумной камере ускорителя.

Каждая двойная формирующая линия ($\Phi \Pi_1$ и $\Phi \Pi_2$) на рис. 8 выполнена в виде замкнутой экранированной конструкции. На рис. 9 показано поперечное сечение ячеек двойной формирующей

ложенных одна над другой. Каждая ячейка состоит из трех конденсаторов, индуктивного элемента и двух экранов — основного и дополнительного. Получающаяся при этом емкость не является паразитной, так как этот проводник и экран составляют полосковую линию, которая фактически параллельна основной. Обе половины двойной формирующей линии расположены параллельно и разделены опорной изолирующей подставкой 5, закрепленной на заземленном основании 6. При этом верхняя часть линии является "потенциальной", а нижняя — заземленной (см. рис. 8).

линии, состоящей из двух линий-секций, распо-

Предполагалось, что такая конструкция позволит уменьшить паразитные емкости и улучшить форму импульса, что впоследствии было



Рис. 8. Схема питания кикера вертикального удара. $\Phi \Pi_1$, $\Phi \Pi_2$ – двойные формирующие линии, T_1 , T_2 – тиратроны ТГИ1-1000/25, K_1 , K_2 – кабельные линии.

подтверждено. Кроме того, формирующая линия получилась достаточно компактной, что позволило разместить четыре одинаковых генератора питания пластин электронного и позитронного инфлекторов в одном стандартном шкафу (см. рис. 10).

При вертикальном ударе по циркулирующему пучку амплитуда импульса регулируется в пределах 1—5 кВ, что соответствует амплитуде тока 80— 400 А. При этом обеспечивается стабильная работа коммутатора (тиратрона). На рис. 11 приведена осциллограмма импульса тока в нагрузке генератора.



Рис. 9. Поперечное сечение двух параллельных ячеек одной $\Phi Л$ генератора вертикального удара, вид с торца. 1 – индуктивный элемент ячейки; 2 – экран; 3 – три последовательных конденсатора; 4 – дополнительный экран; 5 – опорная подставка; 6 – заземленное основание.

ВЛИЯНИЕ ОТРАЖЕННЫХ ИМПУЛЬСОВ НА ПУЧКИ ЧАСТИЦ

При работе с отдельными сгустками частиц необходимо минимизировать воздействие на соседние сгустки, циркулирующие в ВЭПП-4М. В данном случае волновое сопротивление питающей кабельной линии генератора составляет 12.5 Ом, а пластины инфлектора – 25 Ом. Таким образом, последняя является несогласованной нагрузкой для генератора, что неизбежно должно вызывать отражения. Для того чтобы исключить влияние отраженных импульсов на циркулирующие в ускорителе пучки, после сканирования формы импульса пучком (т.е. откликом пучка на изменение времени старта работы генератора) была подобрана оптимальная длина кабелей. Естественно, необходимо, чтобы пучки располагались между отраженными импульсами. Для этого длина кабельной трассы была увеличена. На рис. 12 приведены результаты сканирования с кабелями первоначальной длины (кривая 1) и после добавления 16 м (кривая 2). Видно, что до удлинения кабелей второй электронный пучок попадал на отраженный импульс, а после увеличения длин кабелей пучки расположились между отраженными импульсами.

СИНХРОНИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ

Для запуска системы удара используются два последовательных импульса с управляемой задержкой относительно общего импульса старта системы, который синхронизирован с нулевой фазой частоты обращения в коллайдере и вырабатывается при наличии запроса на удар. Диаграм-



Рис. 10. Основные элементы генератора инфлектора ВЭПП-4М в установочном шкафу. *1* – формирующие линии; *2* – тиратроны; *3* – делители зарядного напряжения, используемые для измерения; *4* – повышающие трансформаторы.

ма синхронизации срабатывания системы показана на рис. 13.

Первый импульс $T_{\Gamma ИМH}$ отпирает тиристорный ключ в ГИМН-0.1Ф, чем запускает процесс заряда формирующей линии. Заряд длится примерно 500 мкс и в момент времени, когда напряжение на линии достигает максимума, появляется второй импульс $T_{тир}$, отпирающий тиратрон, через который формирующая линия разряжается на нагрузку. Первый импульс имеет дискретность регулировки задержки 0.1 мкс, второй импульс, отпирающий тиратрон, -0.1 нс.

После появления запроса на удар ближайший из импульсов нулевой фазы частоты обращения, следующих с интервалом 100 мкс, запускает импульс срабатывания ГИМН-0.1Ф с задержкой $T_{\Gamma ИМH}$. Ровно через 6000 импульсов очередной импульс нулевой фазы запускает таймер задержки импульса $T_{тир}$. Диапазон регулировки задержки $T_{тир}$ перекрывает период обращения в коллайдере, что обеспечивает возможность удара кикером по любому сгустку.



Рис. 11. Осциллограмма импульса с шунта генератора инфлектора ВЭПП-4М.

Блок-схема управления генератора удара показана на рис. 14. С помощью цифроаналогового преобразователя (ЦАП) выполняется управление амплитудой зарядного напряжения на импульсном генераторе ГИМН-0.1Ф (см. рис. 8 и 14), и, тем самым, регулируется амплитуда заряда формирующей линии. Для контроля правильности и стабильности работы уровень зарядного напряжения каждого генератора непосредственно перед срабатыванием измеряется с помощью аналого-цифрового преобразователя ($AЦ\Pi$).

С помощью переключения релейных контактов можно задать любую комбинацию пластин для удара. Во избежание ложного срабатывания генераторы, не использующиеся для удара, отключаются. При заказе удара по определенному



Рис. 12. Результаты сканирования импульса пучком до переделки (1) и после нее (2). Вертикальными штриховыми линиями показано положение электронных пучков (E1-, E2-), а сплошными – позитронных (E1+, E2+).



Рис. 13. Диаграмма синхронизации удара.

сгустку система управления обеспечивает автоматическое переключение генераторов, задание зарядного напряжения и времен задержек для срабатывания нужных генераторов. Для автоматического переключения предусмотрены следующие комбинации: удар по X, удар по Y, удар одновременно по Х и У. Для обеспечения измерений перед ударом отдается команда на переключение контроллеров пикапов [9, 10] в режим пооборотной диагностики. После выполнения удара все устройства возвращаются в исходное состояние. Предусмотрена возможность переключения в состояние готовности удара на длительное время, когда все необходимые для удара переключения и нужные интервалы задержки остаются занесенными в устройства управления. В этом состоянии по заказу из пользовательского приложения удар может выполняться с частотой до нескольких герц, что определяется временем заряда накопителей энергии генераторов ГИМН-0.1Ф.

ИЗМЕРЕНИЯ ПУЧКОВ ЧАСТИЦ

Система возбуждения бетатронных колебаний сгустка частиц является штатной системой ВЭПП-4М и постоянно используется при проведении экспериментов как при работе на пользователей (набор статистики в режиме коллайдера и экспериментов с пучками синхротронного излучения), так и для экспериментов по физике ускорителей [5–7]. С помощью данной системы, например, осуществляется контроль за бетатронными частотами.

На рис. 15 показаны графики профилей импульсов горизонтального и вертикального удара, измеренные с помощью системы удара. Для этого изменялось время запуска генератора удара (ΔT) относительно циркулирующего сгустка частиц и измерялась амплитуда бетатронных колебаний пучка (A_y). Наблюдение колебаний пучка проводилось с помощью системы положения пучка [9, 10] в пооборотном режиме, запуск которой связан с запуском системы удара.

Амплитуда бетатронных колебаний определяется с помощью быстрого преобразования Фурье по 8096 оборотам, а затем уточняется по 100 оборотам сверткой с основной гармоникой, чтобы исключить раскогеренчивание и затухание пучка. Для подгонки экспериментальных точек использовалась функция нормального стандартного распределения (на рис. 15). Время задержки импульса с генератора, при котором амплитуда колебаний пучка максимальна, соответствует про-



Рис. 14. Блок-схема управления одного импульсного генератора.



Рис. 15. Графики профилей импульсов удара: **a** – горизонтального, **б** – вертикального. Constant – амплитуда, Mean – среднее значение, Sigma – среднеквадратичное отклонение.



Рис. 16. Зависимость амплитуды когерентных колебаний пучка от амплитуды напряжения на генераторе удара (**a**) и зависимости горизонтальной (**б**) и вертикальной (**в**) бетатронных частот от горизонтальной амплитуды колебаний.



Рис. 17. Зависимость бетатронных частот от отклонения энергии пучка.

ПРИБОРЫ И ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА № 5 2019

лету пучка через кикер в момент, когда поле кикера достигло максимального значения.

На рис. 16 приведена зависимость амплитуды возбужденных горизонтальных колебаний сгустка электронов от напряжения на генераторе горизонтального удара, а также зависимость частот бетатронных колебаний от амплитуды колебаний. Измерения проводились до полной гибели пучка, что соответствует границе устойчивого движения (динамической апертуры). Измерение для каждого заданного уровня напряжения генератора повторялось несколько раз. На рисунке приведены среднеквадратичные отклонения измеряемых величин. Для получения зависимости амплитуды колебаний от напряжения на генераторе выполнена подгонка полином 3-й степени, а зависимость бетатронных частот от амплитуды – функцией

$$Q_{x,v} = p_0 + p_1 A_x^2,$$

где p_0 — частота малых бетатронных колебаний, p_1 — коэффициент квадратичной зависимости частоты от амплитуды.

На рис. 17 показана зависимость бетатронных колебаний от равновесной энергии пучка (хроматизм бетатронных частот). Изменение равновесной энергии осуществлялось при помощи регулирования частоты обращения (или частоты возбуждения в.ч.-системы коллайдера). Для определения бетатронных частот по пучку производился удар малой амплитудой, чтобы избежать нелинейных эффектов. Для подгонки использовался полином 3-й степени

$$Q_{x,y} = p_0 + p_1 \frac{\Delta E}{E} + p_2 \left(\frac{\Delta E}{E}\right)^2 + p_3 \left(\frac{\Delta E}{E}\right)^3$$

где коэффициенты соответствуют: p_0 — бетатронной частоте малых бетатронных колебаний, p_1 — линейному хроматизму частот, p_2 и p_3 — нелинейному хроматизму.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. *Levichev E.B.* // Phys. Part. and Nucl. Lett. 2016. V. 13. № 7. C. 876.
 - https://doi.org/10.1134/S1547477116070372
- Anashin V.V., Aulchenko V.M., Baldin E.M., Barladyan A.K., Barnyakov A.Yu., Barnyakov M.Yu., Baru S.E., Basok I.Yu., Bedny I.V., Beloborodova O.L., Blinov A.E., Blinov V.E., Bobrov A.V., Bobrovnikov V.S., Bondar A.E. et al. // Phys. Part. and Nucl. 2013. V. 44. № 4. P. 657. https://doi.org/10.1134/S1063779613040035
- 3. Piminov P.A., Baranov G.N., Bogomyagkov A.V., Berkaev D.E., Borin V.M., Dorokhov V.L., Karnaev S.E.,

Kiselev V.A., Levichev E.B., Meshkov O.I., Mishnev S.I., Nikitin S.A., Nikolaev I.B., Sinyatkin S.V., Vobly et al. // Physics Procedia. 2016. V. 84. P. 19. https://doi.org/10.1016/j.phpro.2016.11.005

- Abramov G.N., Akhmetshin R.R., Barnyakov A.Yu., Barnyakov M.Yu., Basok Yu., Blinov V.E., Bobrovnikov V.S., Borodenko A.A., Buzykaev A.R., Grigoriev D.N., Gulevich V.V., Kazanin V.F., Kravchenko E.A., Kononov S.A., Kudryavtsev V.N. et al. // J. Instrumentation. 2014. V. 9. Issue 8: International Conference on Instrumentation for Colliding Beam Physics. INSTR14. Budker Institute of Nuclear Physics. Novosibirsk, Russia, 24 February–01 March 2014. Art.nr C08022. https://doi.org/10.1088/1748-0221/9/08/C08022
- Анчугов О.В., Блинов В.Е., Богомягков А.В., Волков А.А., Журавлев А.Н., Карнаев С.Е., Киселев В.А., Левичев Е.Б., Мешков О.И., Мишнев С.И., Морозов И.И., Мучной Н.Ю., Никитин С.А., Николаев И.Б., Петров В.В. и др. // ПТЭ. 2010. № 1. С. 20.
- Анчугов О.В., Блинов В.Е., Богомягков А.В., Журавлев С.Е., Карнаев С.Е., Карпов Г.В., Киселев В.А., Куркин Г.Я., Левичев Е.Б., Мешков О.И., Мишнев С.И., Мучной Н.Ю., Никитин С.А., Николаев И.Б., Петров В.В. и др. // ЖЭТФ. 2009. Т. 136. № 4. С. 690.
- Anchugov O., Blinov V., Bogomyagkov A., Cherepanov V., Karpov G., Kiselev V., Levichev E., Nikitin S., Nikolaev I., Polunin A., Shubin E., Simonov E., Smaluk V., Struchalin M., Tumaikin G. et al. // Proceedings of the 10th European Particle Accelerator Conference (EPAC 2006). Edinburgh, Scotland, 26–30 June 2006. S. 1. 2006. P. 2787.
- Emanov F.A., Andrianov A.V., Astrelina K.V., Balakin V.V., Barnyakov A.M., Belikov O.V., Berkaev D.E., Blinov M.F., Boimelshtain Y.M., Bolkhovityanov D.Y., Dikansky N.S., Frolov A.R., Karpov G.V., Kasaev A.S., Kondakov A.A. et al. /// Phys. Part. and Nucl. Lett. 2018. V. 15. Issue 7. P. 720.
 - https://doi.org/10.1134/S1547477118070294
- 9. Бехтенев Е.А., Карпов Г.В., Пиминов П.А. // ПТЭ. 2017. № 5. С. 74. https://doi.org/10.7868/S0032816217050044
- Bekhtenev E., Karpov G. // Phys. Part. Nucl. Lett. 2018.
 V. 15. № 7. P. 929. https://doi.org/10.1134/S1547477118070154
- 11. Месяц Г.А. Генерирование мощных наносекундных импульсов. М.: Сов. радио, 1974.
- 12. Kadnikov A., Deviatilov V., Korchuganov V., Matveev Yu., Shvedov D. // WAA18. Bulletin of the American Physical Society. 1995. V. 40 № 3. P. 1114.
- 13. *Ворончев Т.А.* Импульсные тиратроны. М.: Сов. радио, 1958.
- Литвиненко О.Н., Сошников В.И. Расчет формирующих линий. Киев: Гос. изд-во техн. лит. УССР, 1962.
- Киселев А.В. Дис. ... канд. физ.-мат. наук. Новосибирск: ИЯФ СО РАН. 1965. 146 с.