

ПРИМЕНЕНИЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ

УДК 621.384.63

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ НАСТРОЙКИ МАГНИТООПТИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ УСКОРИТЕЛЕЙ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ¹

© 2025 г. Р. З. Мамутов^{a, b, c, *}, Г. Н. Баранов^{a, b, d, **}

^a Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук
Россия, 630090, Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 11

^b Центр коллективного пользования “Сибирский кольцевой источник фотонов”
Института катализа им. Г.К. Борескова Сибирского отделения Российской академии наук
Россия, 630559, Новосибирская область, р. п. Кольцово, пр. Никольский, 1

^c Новосибирский государственный университет
Россия, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 1

^d Новосибирский государственный технический университет
Россия, 630073, Новосибирск, просп. К. Маркса, 20

* e-mail: R.Mamutov@inp.nsk.su

** e-mail: G.N.Baranov@inp.nsk.su

Поступила в редакцию 30.11.2023 г.

После доработки 28.04.2024 г.

Принята к публикации 06.05.2024 г.

Реализовано прикладное программное обеспечение для автоматизации процедур настройки магнитооптической структуры циклических ускорителей. Описаны методы и алгоритмы, основанные на пучковых измерениях и позволяющие оператору быстро обрабатывать экспериментальные данные, полученные из системы диагностики ускорителя. Кроме того, программа служит высокоуровневым контроллером для управления магнитной системой и онлайн-мониторинга ее состояния. Инструмент протестирован и интегрирован в систему управления коллайдера ВЭПП-4М.

DOI: 10.7868/S3034564225070091

1. ВВЕДЕНИЕ

От качества магнитной структуры зависят многие ключевые параметры ускорителя: эмиттанс, светимость, яркость и др. Наличие неидеальностей в элементах неизбежно приводит к уменьшению производительности установки, что в свою очередь отрицательно сказывается на эффективности и точности проводимых экспериментов. Регулярный контроль и коррекция параметров магнитной структуры позволяют достичь проектных параметров ускорителя и поддерживать его состояние. Решение данных задач невозможно без использования специ-

ально разработанных программных систем. Более того, такие системы должны соответствовать актуальным требованиям разработки программного обеспечения (ПО) и постоянно развивающейся инфраструктуре ускорителя.

На ускорителях заряженных частиц проводятся исследования по фундаментальным и передовым направлениям физики высоких энергий, а также эксперименты с синхротронным излучением, исследования в области ядерной физики и других прикладных направлениях [1]. Поэтому контроль состояния магнитооптической структуры и ее улучшение крайне актуальны и необходимы. Для решения задачи

¹ Материалы 28-й конференции по ускорителям заряженных частиц “RuPAC’23”, г. Новосибирск.

коррекции магнитной структуры ускорителей и, как следствие, для повышения производительности циклических ускорителей разрабатывается соответствующий программный инструмент SmartCorrection, в основе которого лежит прецизионный анализ пучковых данных. Такое программное обеспечение решает множество трудоемких задач при работе на ускорителе, таких как оперативный анализ экспериментальных данных, контроль состояния магнитной структуры в реальном времени, автоматизация получения экспериментальных данных и внесение корректирующих поправок в параметры для достижения необходимой конфигурации магнитной системы.

2. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ С УСКОРИТЕЛЕМ

На рис. 1 в упрощенном и обобщенном виде представлена инфраструктура системы управления ускорителя. Работа с источниками питания магнитных элементов, системой диагностики пучка и интегральными параметрами ускорителя осуществляется посредством системных переменных, реализованных на серверном уровне и предоставленных с помощью определенных программных интерфейсов. Оператор и другие категории пользователей используют конечные пользовательские программы для управления установкой и ее системами. Как правило, системы диагностики пучка и управления магнитными элементами на основе автоматизированных систем управления [2–6] предоставляют сетевой доступ к параметрам системы. В частности, это делает опрос показаний датчиков положения пучка (ДПП) и токов источников питания, попадающих в общий доступ из сети комплекса после обработки серверными при-

ложениями, и их задание удобным, доступным и надежным.

Представленная программа относится к программному обеспечению верхнего уровня с пользовательским интерфейсом и предназначена для операторов, управляющих установкой, и физиков, моделирующих параметры ускорителя и пучка. По своему функциональному назначению у программы можно выделить несколько главных задач: сбор и предобработка “сырых” данных; последующий анализ экспериментальных данных, включающий вычислительно-емкие расчеты; высокоуровневое управление элементами и параметрами ускорителя; высокоуровневое архивирование и задание режимов работы установки; визуализация и мониторинг основных параметров магнитной структуры. Взаимодействие с ускорителем осуществляется посредством обращения к системным переменным. В контексте основной решаемой задачи программа обеспечивает автоматизацию операций управления, необходимых для реализации алгоритмов коррекции магнитооптической структуры.

Программа спроектирована таким образом, чтобы сделать вычислительную часть, связанную с моделированием ускорителя и анализом измеренных данных, универсальной и не зависимой от конкретной установки. Данная часть кода оформлена в отдельный модуль общего назначения, что позволяет проводить анализ структуры любого ускорителя, а также моделирование ускорителя и его параметров в отрыве от системы управления и графического интерфейса.

Таким образом, структурно программу можно разделить на три независимые или слабо зависимые компоненты: графический интерфейс, интерфейсы для взаимодействия с установкой и вычислительный модуль. Поскольку алгоритмы коррекции магнитооптической структуры по большей части одинаковы для всех циклических ускорителей, а широко распространенные платформы для разработки систем управления реализуются по похожим стандартам, программа легко адаптируется для использования на другой установке, что делает ее универсальной и гибкой.

3. АЛГОРИТМЫ НАСТРОЙКИ МАГНИТНОЙ СТРУКТУРЫ

Процедура коррекции магнитооптической структуры базируется на измерении и анализе откликов замкнутой орбиты пучка на пооче-

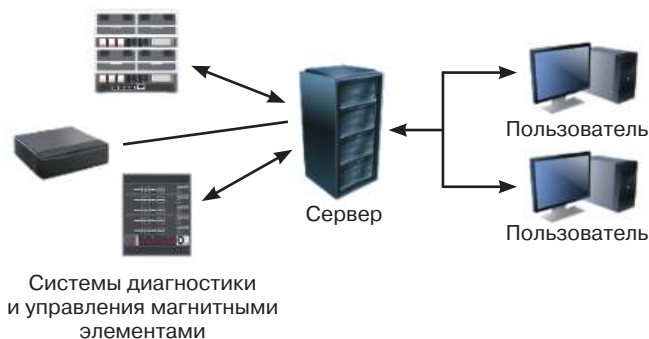


Рис. 1. Упрощенная схема взаимодействия с ускорителем.

редное изменение поля в каждом дипольном корректоре [7] или квадрупольной линзе [8] (в зависимости от задачи). Положение пучка регистрируется всеми ДПП, а составленная матрица из откликов является детальным источником информации о состоянии магнитной структуры и формирует основу экспериментальных данных. Помимо этого, дополнительно измеряются бетатронные частоты колебаний пучка, дисперсия орбиты и возбуждаемые бетатронные колебания пучка в ДПП [9]. Далее происходит подгонка измеренных данных модельными за счет варьирования параметров структуры. Для этого решается задача оптимизации: для каждой матрицы рассчитывается модельная матрица откликов и других параметров ускорителя. Таким способом можно извлекать информацию об имеющихся искажениях в структуре и источниках этих искажений, сравнивая модель и реальный ускоритель. В частности, можно определять ошибки в градиентах полей, физические смещения и повороты магнитных элементов и ДПП, калибровки ДПП и корректоров. Все эти возмущения искажают оптические функции ускорителя, влияют на динамику пучка и негативно сказываются на ключевых параметрах установки, а впоследствии ухудшают качество проводимых исследований на ускорителе.

В зависимости от размера ускорителя и количества его элементов вычислительная задача

может стать трудоемкой, поскольку число варьируемых параметров может возрасти. Более того, часто возникает необходимость разбивать существующие элементы в структуре на компоненты для увеличения точности при численном интегрировании или для корректности моделирования. При этом расчет параметров модели и подгонка экспериментальных данных может занимать часы, что затрудняет оперативную настройку ускорителя. Однако специфика решаемой обратной задачи позволяет увеличить скорость вычислений за счет GPU (Graphics Processing Unit) ускорения [10] и, что более важно, допускает параллельные вычисления за счет CPU (Central Processing Unit) [11]. Как известно, для операций с большими численными массивами отлично подходят вычисления на видеокартах. В данной работе GPU-ускорение используется совместно с CPU-ускорением. Варьирование параметра можно рассматривать как независимую вычислительную задачу, поэтому она хорошо ускоряется путем распределения отдельных подзадач по разным логическим процессорам компьютера. Более того, в программе предусмотрено объединение вычислительных устройств для организации распределенной вычислительной системы. Устройствам, находящимся в общей сети, делегируется часть общей вычислительной задачи и данных, и на каждом запускается необходимая расчет-

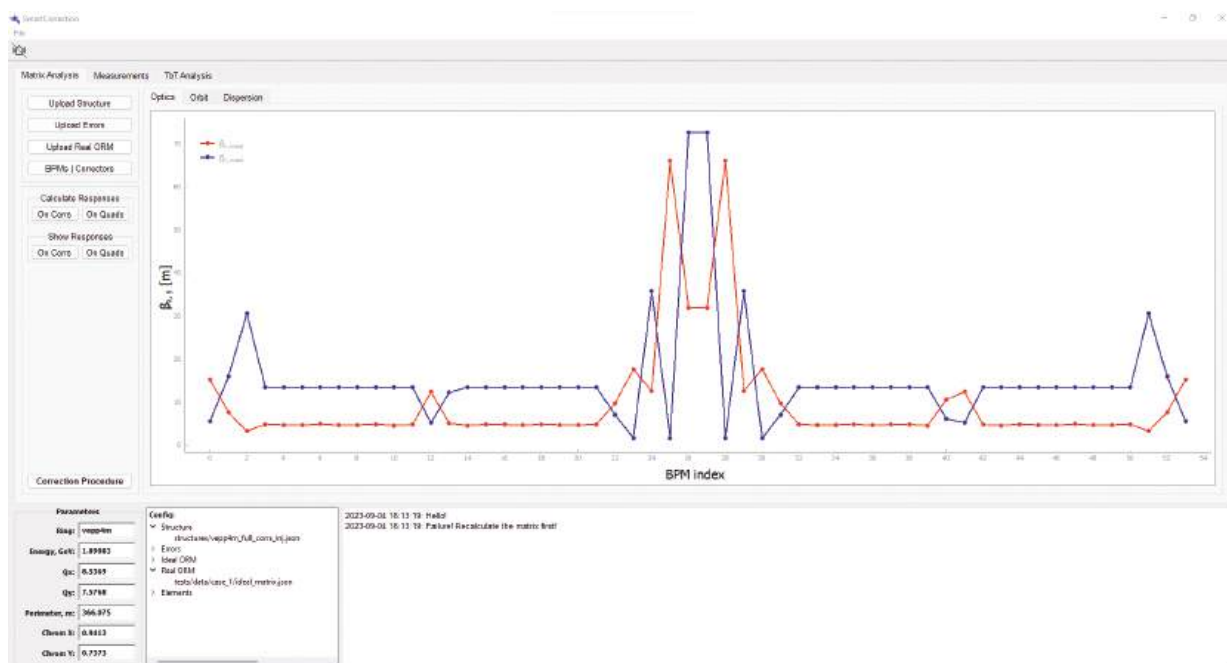


Рис. 2. Главное окно программы с модельными оптическими функциями ускорителя.

ная функция. Экземпляр программы, который является инициатором расчетов, затем выступает в роли сервера и ожидает результат вычислений от каждого устройства для дальнейшей обработки.

На рис. 2 представлено главное окно программы. Здесь осуществляется работа с файлами: загрузка структуры модели ускорителя, найденных искажений структуры, экспериментальных данных. Кроме того, рассчитываются и отображаются модельные оптические функции, являющиеся точным представлением магнитооптической структуры ускорителя. Крайне полезно просматривать и предварительно сопоставлять измеренные данные с модельными. Это позволяет делать первичные выводы о реальной структуре ускорителя и его компонентах, а также обнаруживать систематические ошибки, связанные с измерением и работой установки в целом. Поэтому для визуального контроля предусмотрено окно с графиками, представленное на рис. 3.

Для подгонки экспериментальных данных и задания уставок в источники питания элементов предусмотрена отдельная панель. В результате подгонки пользователь находит структуру со всеми искажениями, соответствующую реальной структуре ускорителя на момент измерения экспериментальных данных. Чтобы скорректировать структуру ускорителя до требуемой, пользователь задает рассчитанные поправки в источники питания элементов, а для части искажений, связанных с физической юстиров-

кой элементов, может потребоваться помощь технического персонала. При необходимости, повторив эксперимент и подгонку, пользователь может откалибровать модель ускорителя с учетом внесенных коррекций для дальнейшего использования и моделирования. На рис. 4 представлен интерфейс вычислительной процедуры. Панель позволяет:

- выбирать подгоночные параметры модели;
- выбирать алгоритм минимизации и число логических процессоров;
- решать обратную задачу: расчет якобиана, выбор сингулярных чисел, обращение матрицы и др.;
- выбирать желаемую итерацию подгонки, очищать и сохранять прогресс;
- составлять необходимые графики и таблицы в ходе прогресса;
- задавать в ускоритель найденные поправки в токах элементов и управлять режимами работы ускорителя.

Показанный на рис. 5 интерфейс предназначен для взаимодействия с ускорителем и получения экспериментальных данных. После подключения к системе управления ускорителя выполняется алгоритм “циклирования” дипольных корректоров и квадруольных линз. Для подготовки к эксперименту и обеспечения воспроизводимости результатов поле каждого магнита, согласно локальному циклу гистерезиса, меняется несколько раз, причем процедура осуществляется для всех магнитов одновременно таким образом, чтобы не разрушать пучок и сильно не искажать орбиту. Это позволяет существенно сократить время проведения всех циклов по отдельности. В этом случае процедура занимает не больше пары минут, тогда как поочередное выполнение магнитного цикла каждого магнита может занять значительное время. Далее реализуется алгоритм измерения матрицы откликов, когда по очереди в каждом магните изменяется поле и по ДПП фиксируется искажение орбиты пучка, которая в это время отслеживается по соответствующим графикам. Как правило, одна полная итерация измерения откликов на большой набор корректоров может занимать несколько часов.

Помимо коррекции магнитной структуры, реализована настройка орбиты: коррекция орбиты к целевой и создание локальных возмущений — “бампов”. Добавлены различные алгоритмы [12], которые по матрице откли-

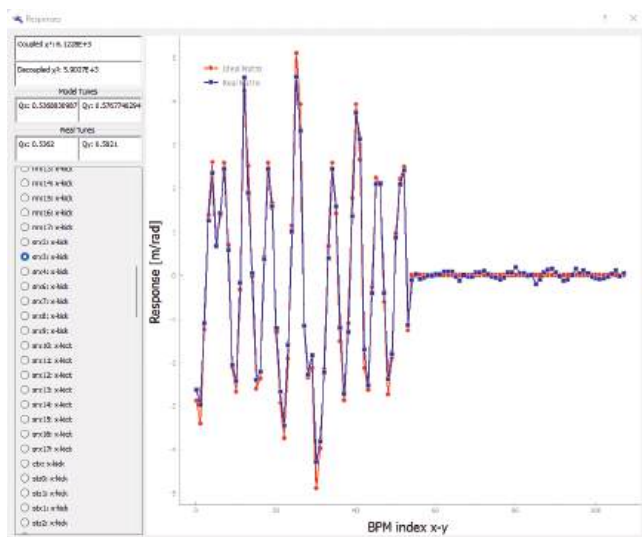


Рис. 3. Окно с визуализацией модельных и измеренных откликов на каждый магнитный элемент. На оси абсцисс продублированы номера датчиков для горизонтальных и вертикальных показаний.

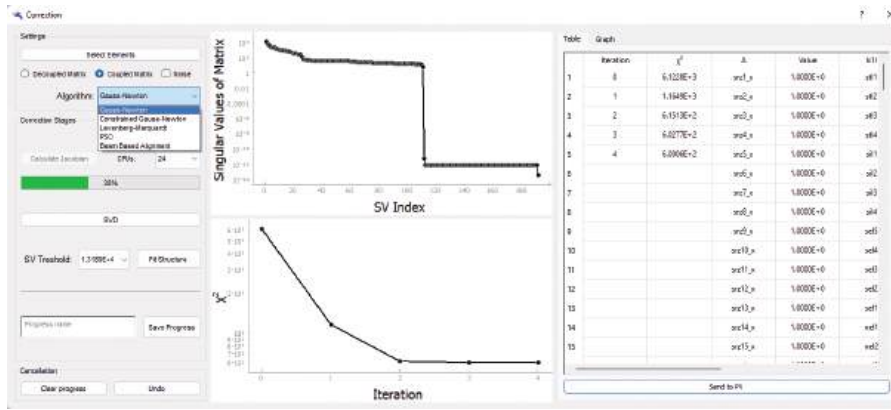


Рис. 4. Подгонка экспериментальных данных модельными. Справа расположена таблица с найденными искажениями структуры.



Рис. 5. Интерфейс взаимодействия с ускорителем: получение данных с ДПП и управление магнитными элементами.

ков вычисляют необходимые токовые добавки в дипольные корректоры. Контроль орбиты, безусловно, является важной частью работы: во-первых, ускоритель работает при фиксированной орбите пучка во время эксперимента; во-вторых, после манипуляций с измерением откликов рабочая орбита должна вернуться в исходное состояние, так же как возвращаются значения полей магнитов.

Независимый и оперативный контроль магнитной структуры основан на анализе возбуждаемых бетатронных колебаний пучка в ДПП. За счет гармонического анализа осцилляций пучка

удается определить оптические функции ускорителя и бетатронные частоты. На рис. 6 представлено окно, содержащее необходимый функционал. Важно отметить, что данный алгоритм используется как вспомогательный, позволяющий отслеживать динамику оптических функций во время основной коррекции методом матриц откликов.

В ходе работы программы формируется два журнала событий. Первый относится к эксперименту и анализу, второй, предназначенный для протоколирования и отладки внутренних событий программы, записывается в базу данных

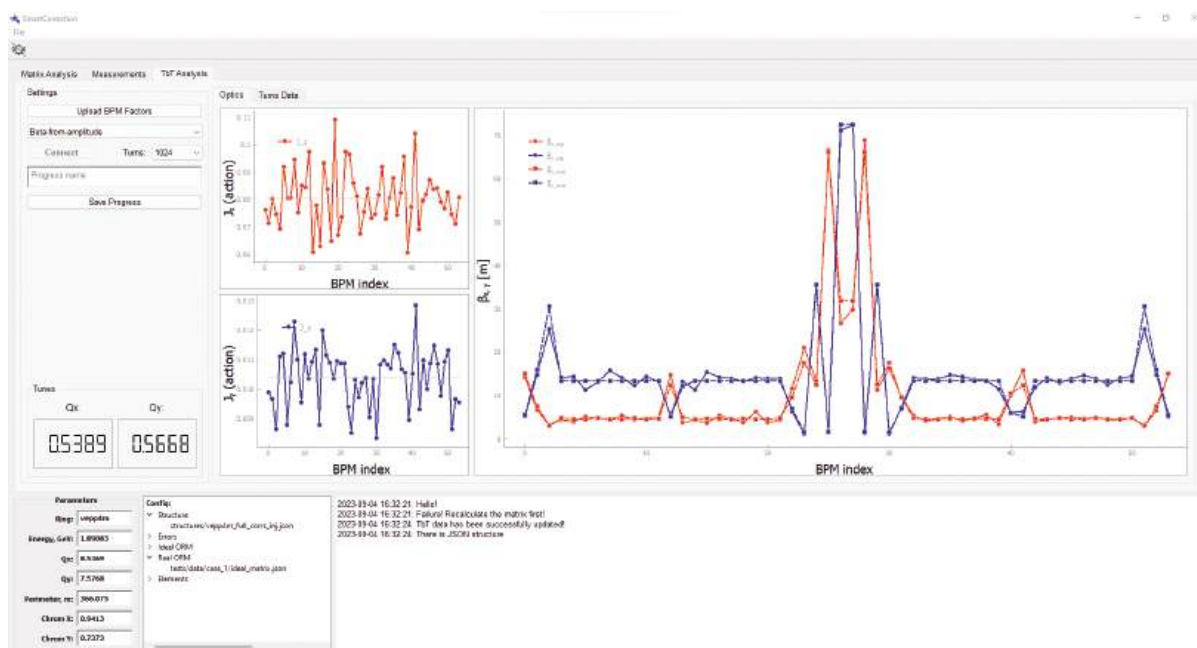


Рис. 6. Анализ возбуждаемых бетатронных колебаний пучка, полученных с ДПП. На графиках представлены восстановленные оптические функции.

PostgreSQL. Многие основные настройки программы указываются по умолчанию в специальном конфигурационном файле.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В 2022–2023 гг. программа была внедрена в систему управления коллайдера ВЭПП-4М [13–15] и активно использовалась при настройке оптики установки. В ходе работы получены результаты, которые позволили улучшить состояние магнитной структуры установки, скорректировав оптические функции, обнаружить некорректно работающие элементы и откалибровать модель. Разработанная программа является надежным и неотъемлемым инструментом на ускорительном комплексе. Кроме того, ведется работа по достижению абсолютной универсальности в применении на других ускорителях с разными магнитными структурами и системами управления. Дальнейшее использование разработанной системы для получения наилучших параметров установок планируется на ускорителях ВЭПП-3, ВЭПП-5, ВЭПП-2000, а также на строящемся синхротроне СКИФ.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда и правительства Новосибирской области (грант РНФ № 22-12-20025

“Проведение фундаментальных научных исследований и поисковых научных исследований отдельными научными группами”). Работа частично выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания Института катализа СО РАН (проект FWUR-2024-0041).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Barbatat O.* Applications of particle accelerators. CERN-AC-90-04-DI-BLIT. CERN, 1990. <http://dx.doi.org/10.5170/CERN-1994-001.841>
2. *Dalesio L.R., Kozubal A.J., Krammer M.R.* EPICS architecture. New Mexico: Los Alamos National Lab, 1991. <https://www.osti.gov/biblio/6110347>
3. TANGO Controls. URL: <https://www.tango-controls.org/>
4. *Bolkhovityanov D., Cheblakov P.B., Emanov F.A.* // Proc. ICALEPCS'15. Melbourne: JACoW, 2015. P. 915. <http://dx.doi.org/10.18429/JACoW-ICALPCS2015-WEPGF093>
5. *Singh S.* // Proceedings of the DAE Symp. on Nucl. Phys. 2010. V. 55. P. I18.
6. WinCC Open Architecture. URL: <https://www.winccoa.com/>
7. *Safranek J.* // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. 1997. V. 388. Iss. 1–2. P. 27. [https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(97\)00309-4](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(97)00309-4)

8. *Kim K., Huang J., Ko I.* // Japanese Journal of Applied Physics. 1999. V. 38. № 12R. P. 6926.
<https://doi.org/10.1143/JJAP.38.6926>
9. *Alexahin Y., Gianfelice-Wendt E.* // JINST. 2011. V. 6. P. P10006.
<https://dx.doi.org/10.1088/1748-0221/6/10/P10006>
10. *Cook S.* CUDA Programming: A Developer's Guide to Parallel Computing with GPUs. San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers Inc., 2012.
<https://doi.org/10.1016/C2011-0-00029-7>
11. *Chandrashekar B.N., Sanjay H.A., Srinivas T.* // International Conference on Artificial Intelligence and Smart Systems (ICAIS). Coimbatore: IEEE. 2021. P. 646.
<https://doi.org/10.1109/ICAIS50930.2021.9395977>
12. *Mirza S.H., Singh R., Forck P., Klingbeil H.* // Phys. Rev. Accel. Beams. 2019. V. 22. Iss. 7. P. 072804.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevAccelBeams.22.072804>
13. *Piminov P.A., Baranov G.N., Bogomyagkov A.V., Borin V.M., Dorokhov V.L., Karnaev S.E., Karyukina K. Yu., Kiselev V.A., Levichev E.B., Meshkov O.I., Mishnev S.I., Morozov I.A., Nikolaev I.B., Okunev O.N., Simonov E.A. et al.* // Proc. RuPAC'21. Alushta: JACoW Publishing, 2021. P. 34.
<https://doi.org/10.18429/JACoW-RuPAC2021-TUA01>
14. *Бехтенов Е.А., Карпов Г.В., Пиминов П.А.* // ПТЭ. 2017. № 5. С. 78.
<https://doi.org/10.7868/S0032816217050044>
15. *Bekhtenev E.A., Karpov G.V.* // Phys. Part. Nucl. Lett. 2018. V. 15. Iss. 7. P. 929.
<https://doi.org/10.1134/S1547477118070154>