

УДАРНЫЙ МАГНИТ ДЛЯ ВЫВОДА ПУЧКА ИЗ БУСТЕРА В КАНАЛ “БУСТЕР–НУКЛОТРОН” КОМПЛЕКСА NICA

© 2022 г. О. В. Анчугов^а, Д. А. Шведов^{а,*}, В. А. Киселев^а, А. Н. Журавлев^а,
С. В. Синяткин^а, Д. И. Бажутов^а, А. В. Тузиков^б, А. А. Фатеев^б, А. С. Петухов^б

^а Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН
Россия, 630090, Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 11

^б Объединенный институт ядерных исследований
Россия, 141980, Дубна Московской обл., ул. Жолио-Кюри, 6

*e-mail: D.A.Shvedov@inp.nsk.su, shvedda@mail.ru

Поступила в редакцию 29.12.2021 г.

После доработки 02.02.2022 г.

Принята к публикации 03.02.2022 г.

Для ускорительного комплекса NICA в ОИЯИ (Дубна) разработан ударный магнит для выпуска ионов в канал, соединяющий синхротроны Бустер и Нуклотрон. Для получения необходимого значения магнитного поля 0.17–0.18 Тл в области выводимого пучка была применена несимметричная конструкция магнита без использования ферромагнитного сердечника. Предложена схема питания ударного магнита с помощью двух генераторов разной полярности, подключенных с противоположных концов. Данный ударный магнит позволил успешно вывести ионы He и Fe из Бустера NICA в соответствии с заданными параметрами.

DOI: 10.31857/S0032816222040024

1. “БЕЗЖЕЛЕЗНЫЕ” УДАРНЫЕ МАГНИТЫ

1.1. Симметричная схема формирования поля

В ударных магнитах без ферромагнитных сердечников, в отличие от часто используемых си-

стем — ферритовых кикеров с керамической вакуумной камерой [1], отклоняющее магнитное поле формируется посредством токонесящих проводников и проводящих экранов [2]. Один из наиболее простых вариантов такого магнита показан на

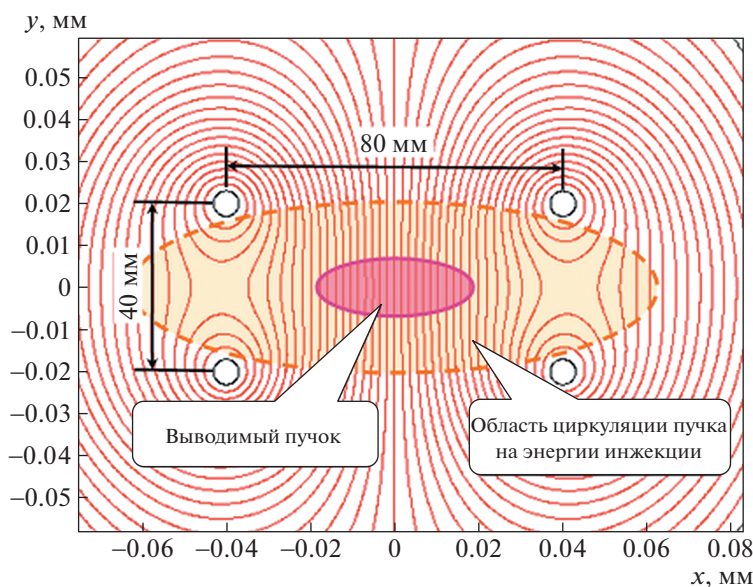


Рис. 1. Схема формирования магнитного поля токонесящими проводниками.

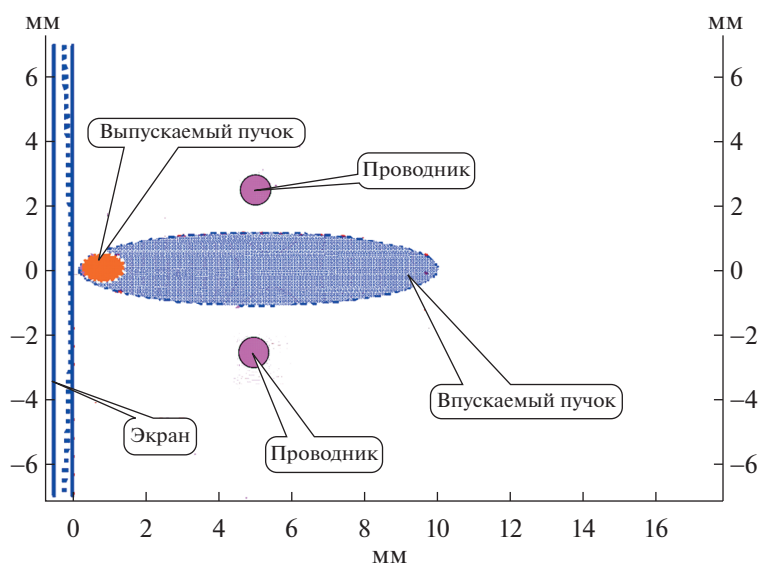


Рис. 2. Схема расположения пучков относительно элементов ударного магнита.

рис. 1, где наглядно иллюстрируется характерная ситуация для ионного бустера, когда инжектируемый пучок заполняет весь акцептанс. Далее, в процессе ускорения пучок адиабатически затухает и к моменту выпуска имеет существенно меньший размер. И именно в таких условиях энергетическая эффективность “безжелезного” варианта магнита может быть сравнима или даже превышать эффективность традиционных вариантов. При этом может быть достигнута достаточно высокая однородность магнитного поля в рабочей области.

1.2. Несимметричный кикер-магнит

При выводе пучков с размерами, значительно меньшими размеров камеры, в зоне вывода обычно используют предварительное адиабатическое смещение пучка в сторону вывода — так называемый “бамп”. Это позволяет существенно снизить требования к величине интеграла поля ударного магнита. Для таких вариантов вывода пучков может быть использована “несимметричная” конструкция ударного магнита без ферромагнитного сердечника как менее энергозатратная для создания поля в нужной области апертуры ускорителя.

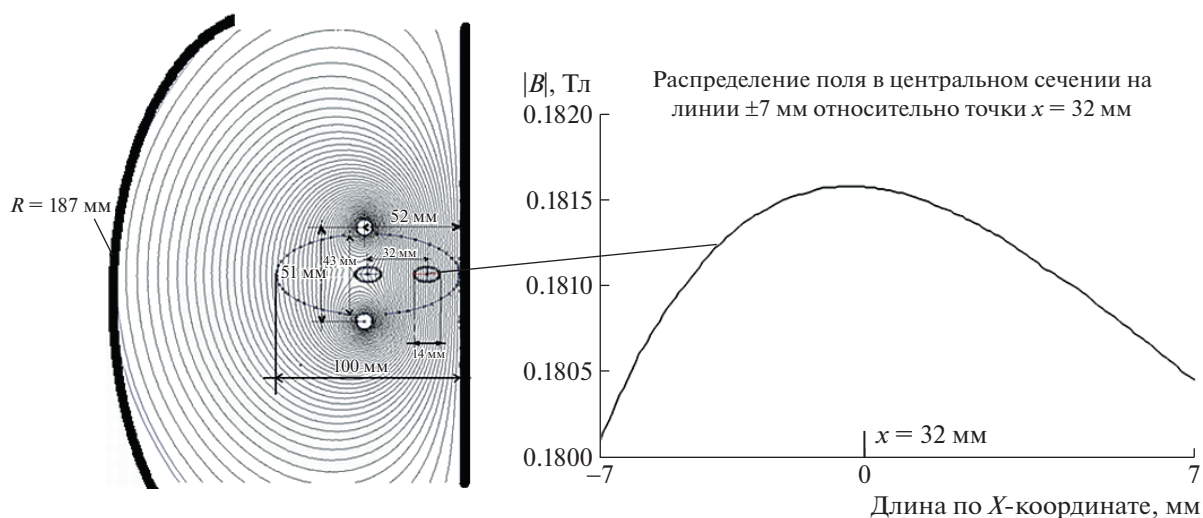


Рис. 3. 2D-картина поля ударного магнита в поперечном сечении и однородность поля в области пучка.

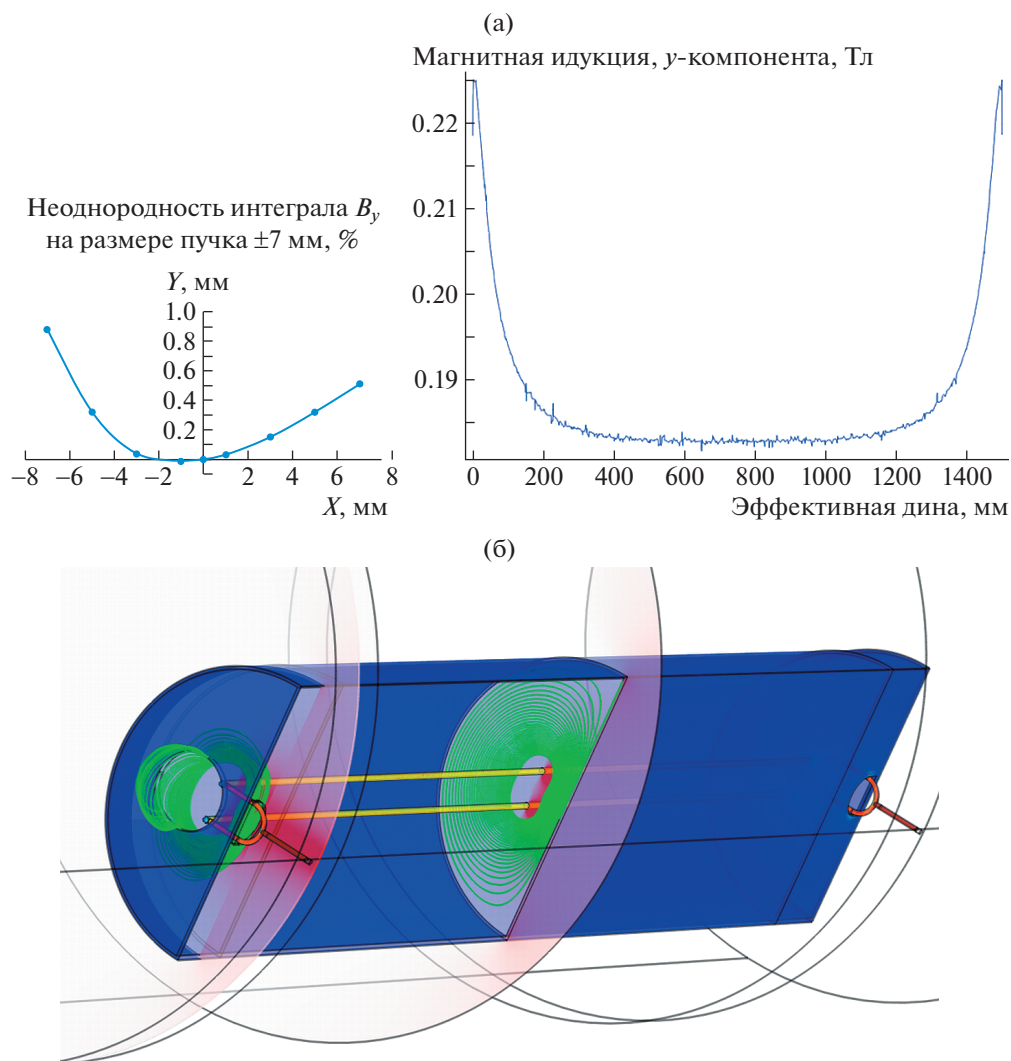


Рис. 4. а — компьютерное 3D-моделирование поля ударного магнита: неоднородность поперечного интеграла поля и распределение у-компоненты поля на эффективной длине магнита; б — структура силовых линий в двух поперечных сечениях — в центре и на входе в магнит.

Принципиальная конструкция такого ударного магнита представлена на рис. 2.

Магнитное поле в области выводимого пучка формируется парой токонесущих проводников и проводящим экраном. В простейшем случае экран плоский.

2. ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ УДАРНОГО МАГНИТА ВЫВОДА ПУЧКА ИЗ БУСТЕРА КОМПЛЕКСА NICA

Для ускорительного комплекса NICA (ОИЯИ, г. Дубна) [3] был разработан ударный магнит для выпуска ионов в канал, соединяющий синхротроны Бустер и Нуклотрон [4]. Конструкция ударного магнита не имеет ферромагнитного сер-

дечника и состоит из одной пары проводников, соединенных параллельно, и стального экрана с полукруглым сечением, имеющим плоскую стенку в районе выводимого пучка [5]. Стенка заменяет вторую пару проводников с противоположным направлением тока, симметричную относительно центра пучка. Индуктивность данной конструкции составляет 650 нГн. Взаимная геометрия электродов и экрана формирует на орбите пучка необходимую конфигурацию магнитного поля с однородностью порядка 1.6% (рис. 3). Основные параметры ударного магнита приведены ниже:

- Эффективная длина магнита, м 1.6
- Максимальная жесткость выводимых частиц, Тл м 25
- Максимальное магнитное поле, Тл 0.18

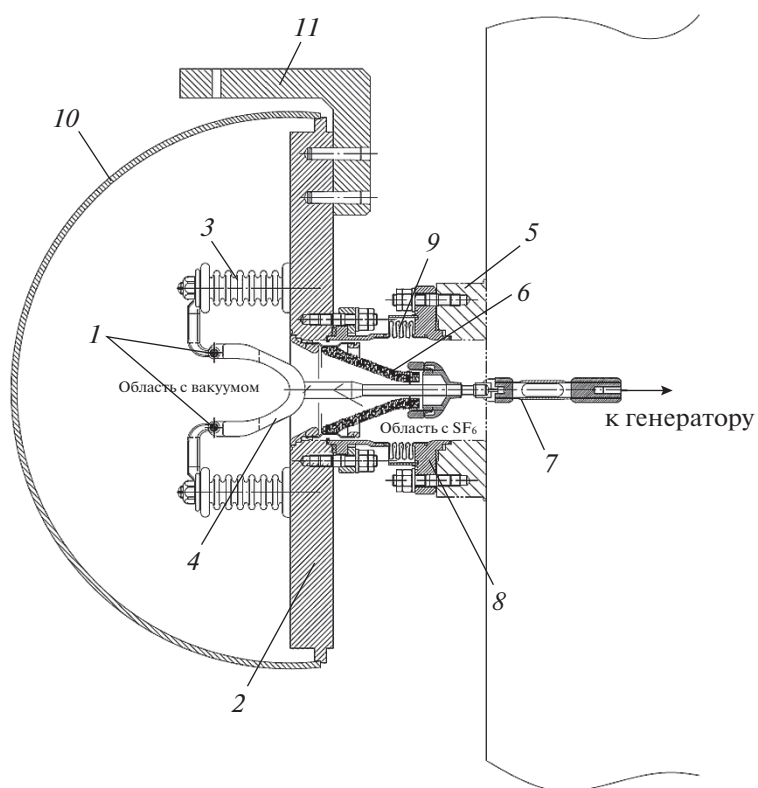


Рис. 5. Поперечное сечение ударного магнита в месте высоковольтного ввода генератора. 1 – рабочие электроды; 2 – экранирующая опорная стенка (плита); 3 – опорные изоляторы; 4 – держатель электродов; 5 – фланец корпуса генератора; 6 – проходной высоковольтный изолятор; 7 – гибкая проводящая часть токоввода; 8 – корпус токоввода; 9 – сильфонная развязка; 10 – экран; 11 – геодезический кронштейн.

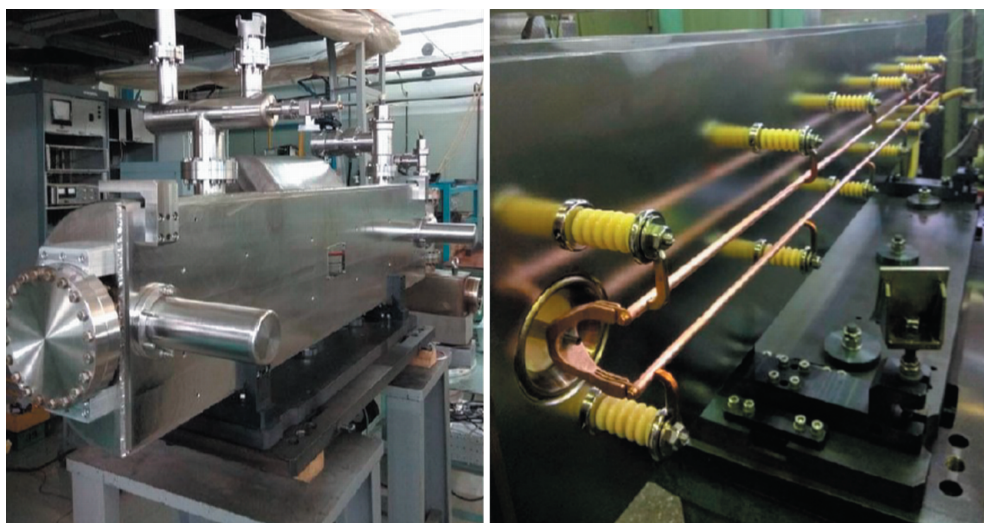


Рис. 6. Ударный магнит в процессе производства: слева – общий вид готового магнита с заглушками, защищающими высоковольтные токовводы; справа – внутренняя вакуумная часть магнита с рабочими электродами.



Рис. 7. Генераторная часть токоввода с гибким контактом.

– Максимальный ток в электродах, кА	32
– Длительность “плато импульса”, нс	500
– Длительность переднего фронта импульса, нс	500
– Диаметр рабочих электродов, мм	8

Для оптимизации схемы питания ударного магнита были промоделированы различные режимы. В результате выбрана схема питания пары электродов с индуктивностью 650 нГн с помощью двух генераторов, подключенных с противоположных концов с разной полярностью токов выходных импульсов. Такая схема питания позволила уменьшить эффективную индуктивность ударного магнита в 2 раза и в результате получить необходимую скорость нарастания фронта импульса и длительность “плато” при приемлемых параметрах генератора.

На рис. 4 показаны результаты моделирования поля ударного магнита в 3D-модели с помощью пакета COMSOL.

3. ОПИСАНИЕ КОНСТРУКЦИИ УДАРНОГО МАГНИТА

На рис. 5 показано поперечное сечение магнита в месте токоввода и отмечены основные узлы.

Быстрый вывод ионов из Бустера осуществляется в 2 этапа. На первом этапе циркулирующий пучок подводится к плите (2 на рис. 5). На втором

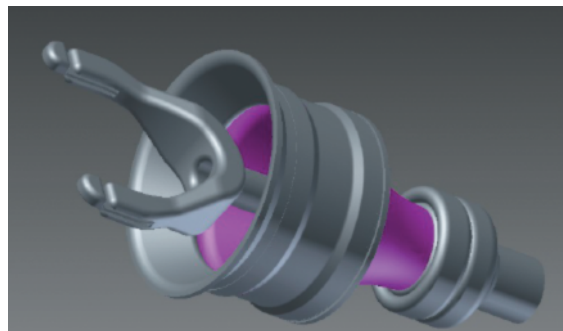


Рис. 8. Электродная часть токоввода.

этапе ударный магнит воздействует на пучок, и осуществляется собственно вывод ионов из Бустера.

На рис. 6 показаны фотографии общего вида готового магнита с заглушками, защищающими высоковольтные токовводы, и внутренней вакуумной части магнита с рабочими электродами.

Высоковольтные вводы (см. рис. 5) представляют собой коаксиальную конструкцию, состоящую из герметичного корпуса из нержавеющей стали, медного гибкого токоввода 7 со стороны входа в корпус генератора, проходного высоковольтного изолятора 6 из вакуумно-плотной керамики с содержанием Al_2O_3 99.7% и держателя электродов 4. Вводы имеют рабочую среду элегаза (SF_6) под давлением до 0.5 избыточной атмосферы и рассчитаны на прохождение на электроды кикера импульсов амплитудой до 60 кВ. Держатель электродов 4 позволяет компенсировать возможные тепловые деформации конструкции при вакуумном прогреве магнита и при воздействии на электроды механических колебаний при прохождении по ним высоковольтного импульса. Сами электроды с держателем определенной формы выставлены с необходимым зазором по вертикали и горизонтали, согласно размерам апертуры циркулирующего пучка, и не препятствуют его прохождению по вакуумной камере. Электроды крепятся к экранирующей плите с помощью опорных керамических изоляторов 3. Количество изоляторов оптимизировано на основании расчетов механических нагрузок при прохождении рабочих импульсов.

На рис. 7 показана часть токоввода со стороны входа в корпус генератора. Гибкий проводник 7 (см. рис. 5) состоит из медной оплетки с внутренней непроводящей шпонкой для поддержания объемной формы проводника. Такая конструкция позволяет проводить точное сочленение маг-

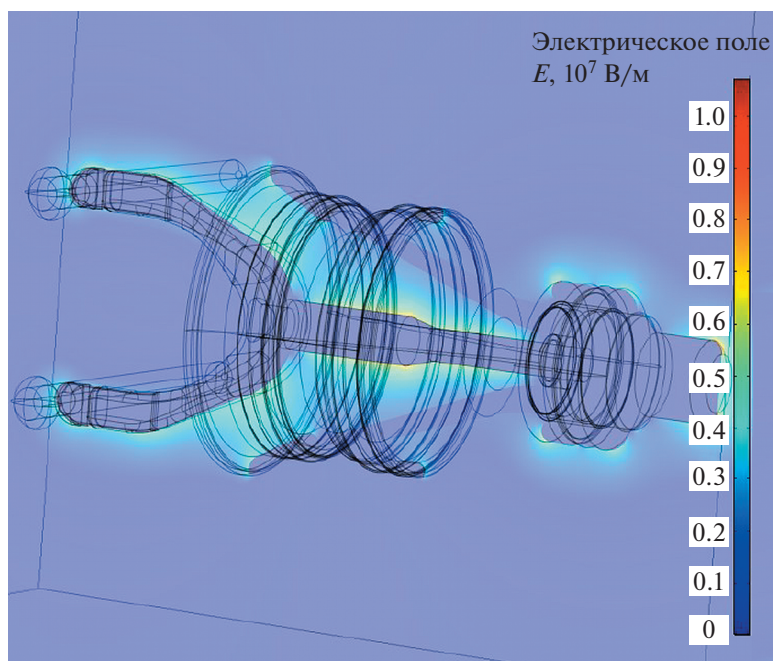


Рис. 9. Результаты моделирования напряженности электрического поля.

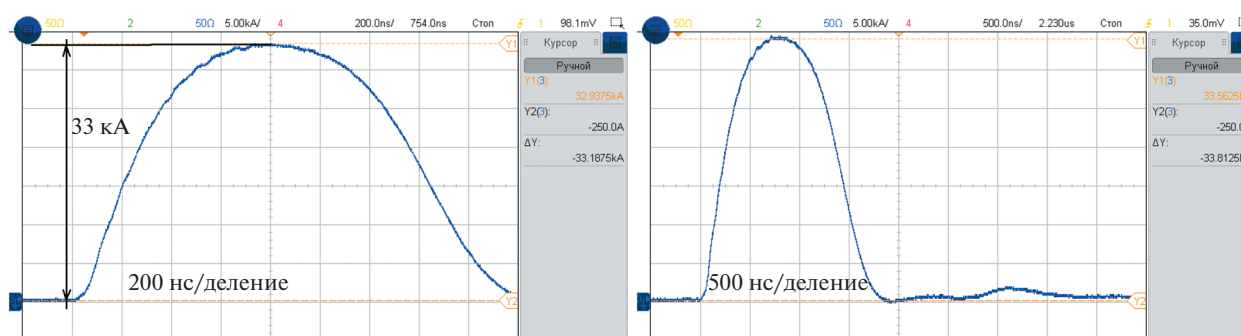


Рис. 10. Результаты испытаний генераторов ударного магнита на эквивалентную нагрузку. Сигнал с пояса Роговского при зарядном напряжении 47 кВ. Амплитуда тока 33 кА.

нита с генераторами, исключить возможные механические нагрузки на изолятор и обеспечить надежные электрические контакты. Сам ударный магнит размещен на специальной подставке и выставляется на ускорителе по геодезическим знакам, расположенным на кронштейнах 11 (см. рис. 5), с помощью специальных регулировочных элементов.

Для электродной части токоввода (рис. 8) было проведено компьютерное моделирование в электростатическом режиме для выявления особо напряженных мест, что было учтено при оптимизации конструкции корпуса ввода. Полученные в

рабочем варианте конструкции максимальные напряженности поля до 90 кВ/см как в сверхвысоком вакууме, так и в атмосфере SF_6 являются вполне допустимыми (рис. 9).

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ УДАРНОГО МАГНИТА

После сборки магнита были проведены вакуумные испытания, в ходе которых достигнут вакуум до 10^{-10} Торр. Также были проведены электрические испытания при постоянном напряжении до 50 кВ. Пробоев в вакууме и во вводах не

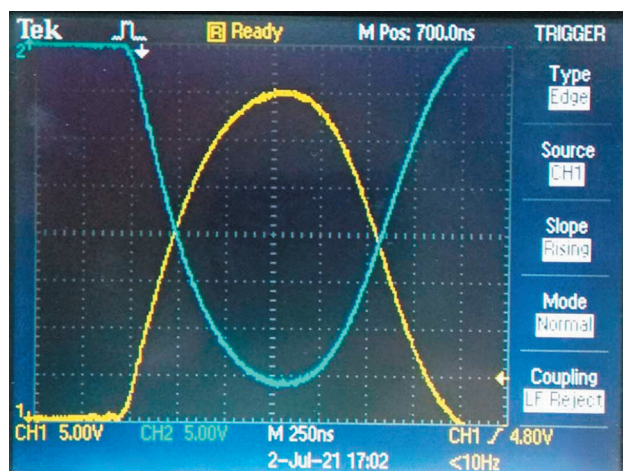


Рис. 11. Импульсы с поясов Роговского генераторов “плюс” и “минус” при прогоне ударного магнита в канале Бустер—Нуклотрон. Напряжение 45 кВ и амплитуда тока 32 кА.

наблюдалось. Далее были проведены импульсные испытания магнита от генераторов с подачей SF_6 в токовводу.

На рис. 10 показаны осциллограммы выходных импульсов генераторов, снятых с поясов Роговского, расположенных в генераторной части токоввода.

На рис. 11 показаны результаты испытаний магнита на комплексе NICA на его рабочем месте.

В настоящее время на комплексе NICA был осуществлен успешный выпуск ионов He^{1+} и

Fe^{14+} в канал Бустер—Нуклотрон с расчетными рабочими параметрами данного ударного магнита. В режиме неполной рабочей энергии Бустера до 240 МэВ/нуклон получен выпуск ионов железа при напряжении ударного магнита не более 17 кВ и соответственно токе 12 кА (рис. 12), что соответствует максимальному полю в магнитах канала для транспортировки неободранных ионов с $Z/A = 4$.

Для полной рабочей энергии Бустера 600 МэВ/нуклон (для ионов с $Z/A = 6$) понадобятся максимальный ток 32 кА и напряжение 45 кВ. В ходе сеанса работы Бустера были осуществлены успеш-

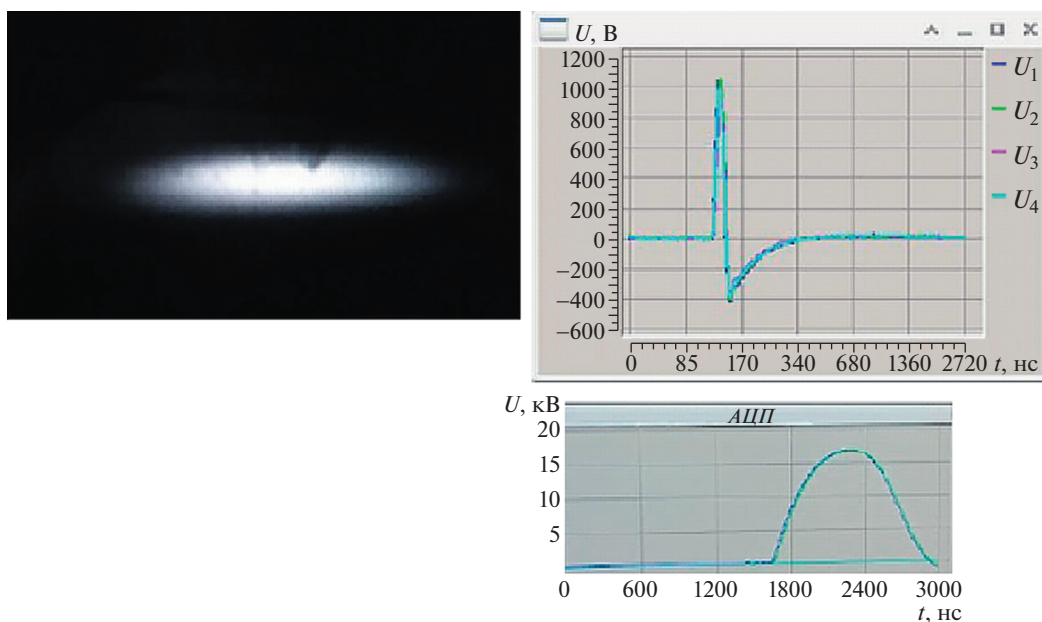


Рис. 12. Скриншот с пульта управления: слева — выпущенный из Бустера NICA пучок на люминофоре; справа: сверху — сигналы с электродов пикапа при выпущенном пучке из Бустера, внизу — импульсы кикера.

ная тренировка и прогон ударного магнита на этих параметрах в течение нескольких часов без непосредственного вывода пучка.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анчугов О.В., Шведов Д.А., Киселев В.А., Корепанов А.А., Синяткин С.В. // ПТЭ. 2015. № 3. С. 16.
<https://doi.org/10.7868/S0032816215030118>
2. Alexandrov V.S., Gorbachev E.V., Tuzikov A.V., Fateev A.A. // Phys. of Particles and Nuclei Letters. 2012. V. 9. № 4–5. P. 425.
<https://doi.org/10.1134/S1547477112040073>
3. Trubnikov G., Agapov N., Brovko O., Butenko A., Donets E., Eliseev A., Fimushkin V., Gorbachev E., Govorov A., Ivanov E., Karpinsky V., Kekelidze V., Khodzhbagiyani H., Kovalenko A., Kozlov O. et al. // Proc. of 4th International Particle Accelerator Conference IPAC'13. Shanghai, China, 2013. P. 1343.
4. Tuzikov A., Butenko A., Donets D., Govorov A., Levterov K., Meshkov I., Smirnov A., Syresin E., Volkov V., Zhuravlev A., Kiselev V., Okunev I., Sinyatkin S., Tasset-Maye O. // Proc. of XXVI Russian particle accelerator conference (RuPAC–2018). NRC KI–IHEP. Protvino, 01–05 октября 2018. P. 52.
<https://doi.org/10.18429/JACoW-RUPAC2018-TUCDMH01>
5. Aleksandrov V., Fateev A.A., Tuzikov A. // Proc. of XXV Russian Particle Accelerator Conf. RuPAC-2016 (St. Petersburg, Russia, 2016) 2017. P. 566.
<https://doi.org/10.18429/JACoW-RuPAC2016-THP-SC013>