

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
имени М.В. ЛОМОНОСОВА

Ханкин Вадим Валерьевич

**Экспериментальное исследование  
динамики пучков в импульсном линейном  
ускорителе и разрезном микротроне**

Специальность 01.04.20 –  
Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника

ДИССЕРТАЦИЯ  
на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:  
доктор физико-математических наук,  
профессор Шведунов В.И.

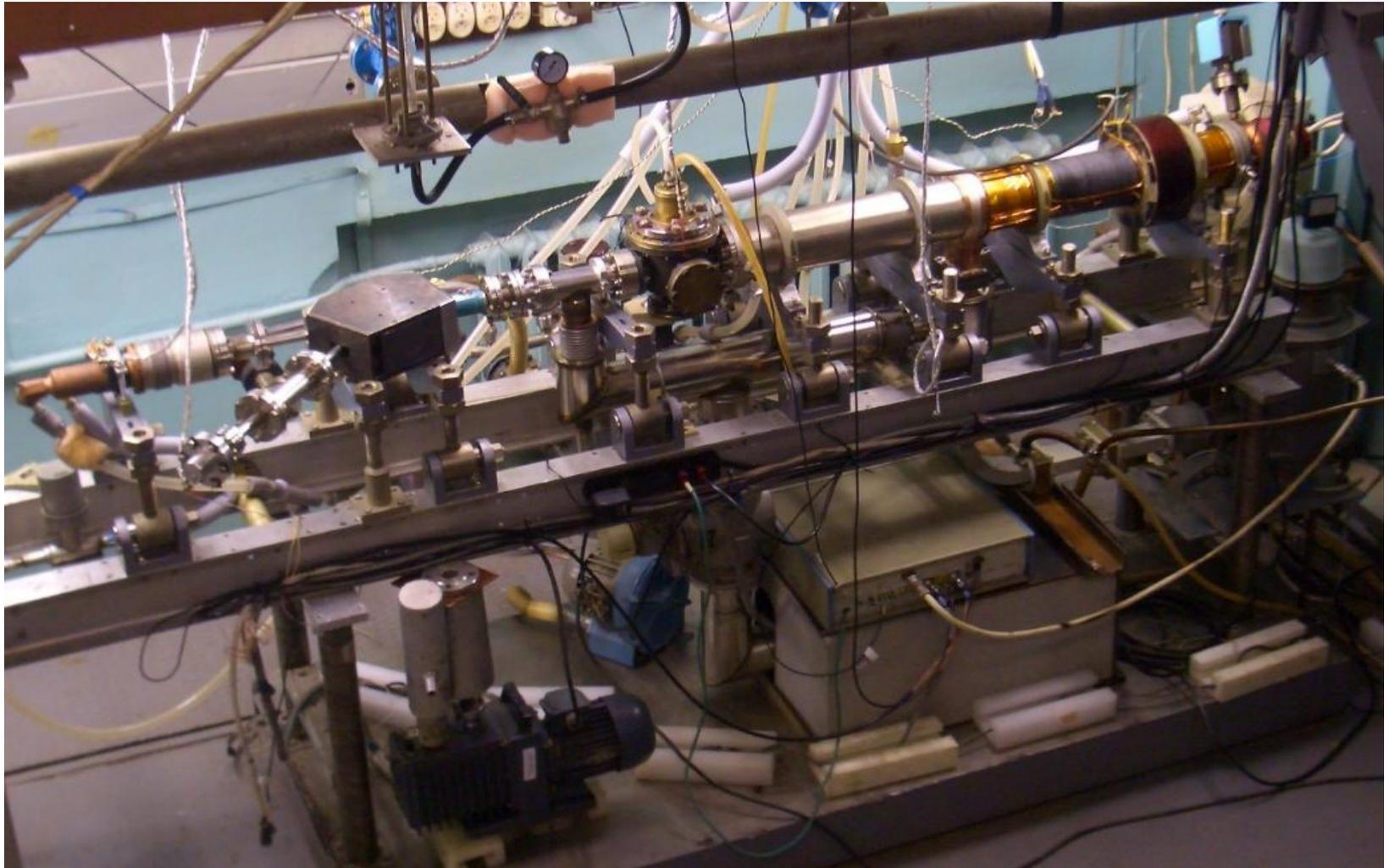
# Содержание работы

- Введение
- Глава 1. Линейный ускоритель электронов на энергию 10 МэВ
  - 1.1 Ускоряющая структура и динамика пучка
  - 1.2 Стенды линейного ускорителя
- Глава 2. Измерение параметров пучка линейного ускорителя
  - 2.1 Измерения на стенде №1
  - 2.2 Измерения на стенде №2
  - 2.3 Применение разработанного ускорителя в радиационных технологиях
- Глава 3. Стенд импульсного разрезного микротрона на энергию 55 МэВ
  - 3.1 Состав стенда разрезного микротрона
  - 3.2 Динамика пучка в РМ
  - 3.3 Элементы РМ
- Глава 4. Методика, результаты настройки и эксперименты на РМ
  - 4.1 Методика, результаты настройки
  - 4.2 Эксперименты на разрезном микротроне
- Заключение
- Литература

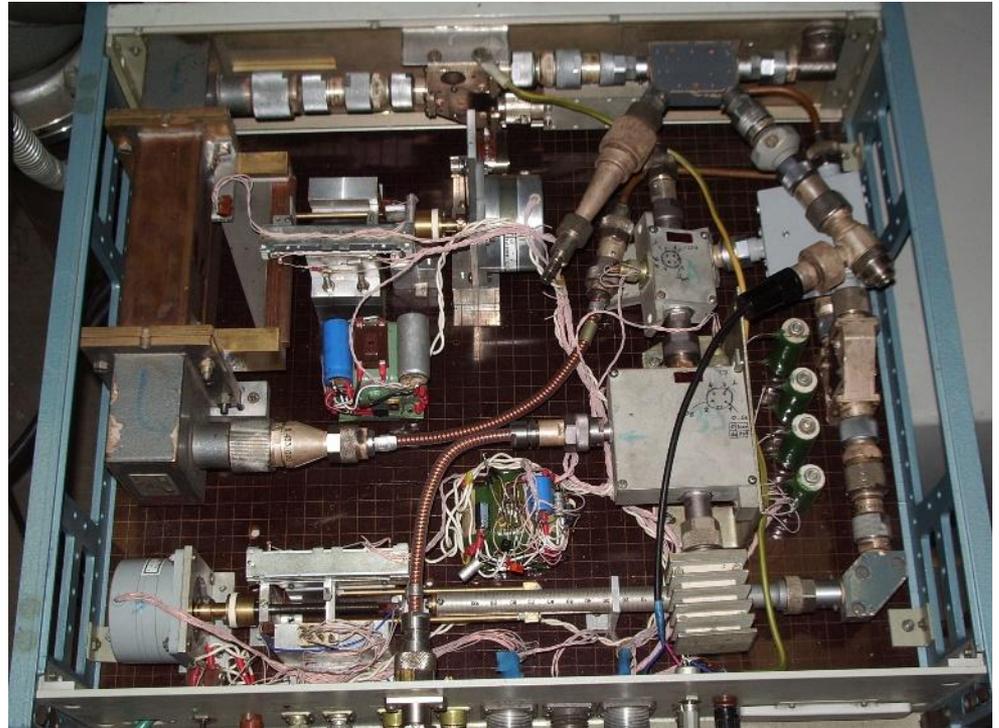
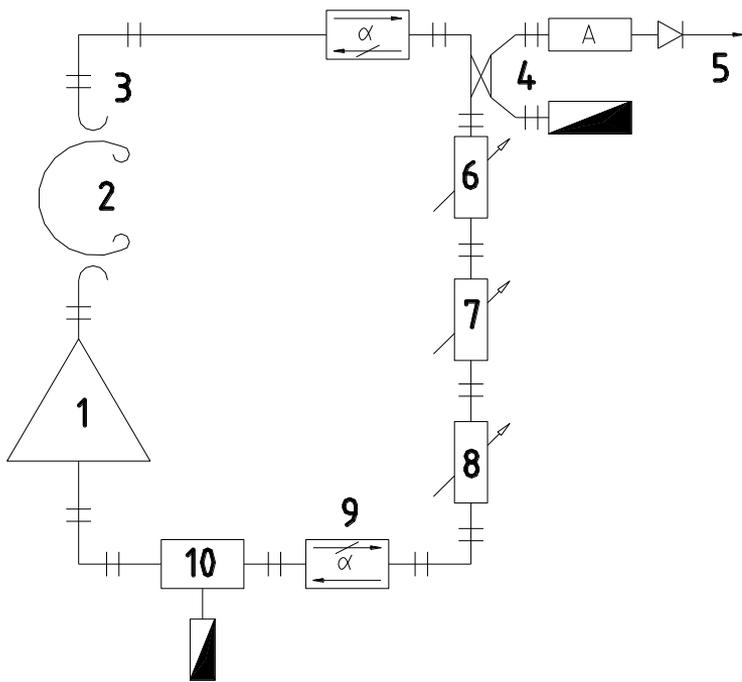
# Расчетные характеристики линейного ускорителя

Напряжение на первом аноде электронной пушки	-50кВ
Напряжение на управляющем электроде электронной пушки	12,9кВ
Импульсное значение тока пушки	750мА
Импульсное значение ускоренного тока	450мА
Средняя энергия ускоренного пучка электронов	9,9МэВ
Коэффициент захвата	60%
Электронный кпд	75%
Величина энергетического разброса на выходе структуры	0,6МэВ
Фазовая ширина ускоренного сгустка	25°
Среднеквадратичный радиус пучка на выходе структуры	1,868мм
Среднеквадратичный нормализованный эмиттанс	12,5мм*мрад
Среднеквадратичная расходимость ускоренного пучка	1,21мрад
Импульсная мощность потерь пучка	68,1кВт
Импульсная мощность СВЧ потерь в ускоряющей структуре	1,5МВт

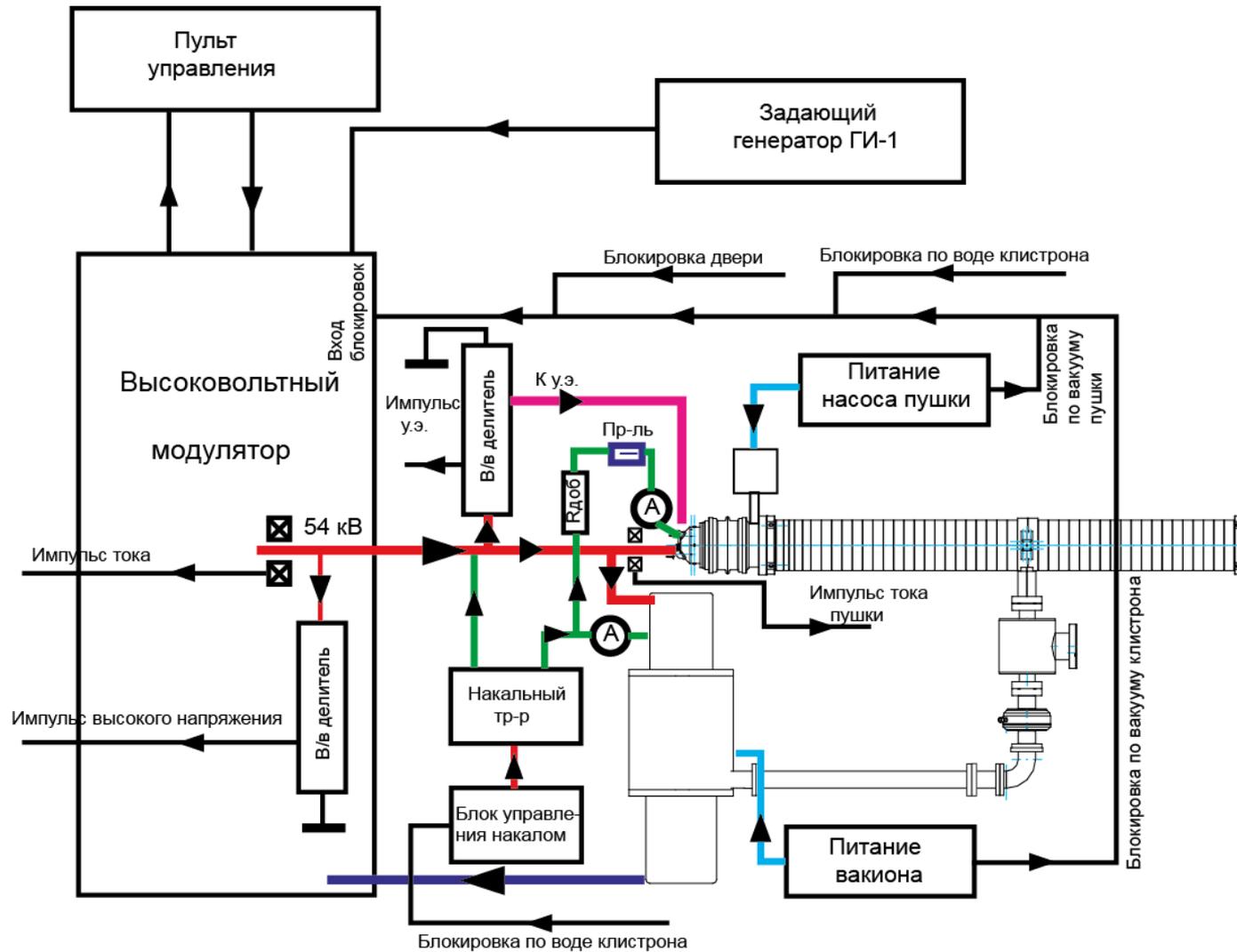
# Стенд №1



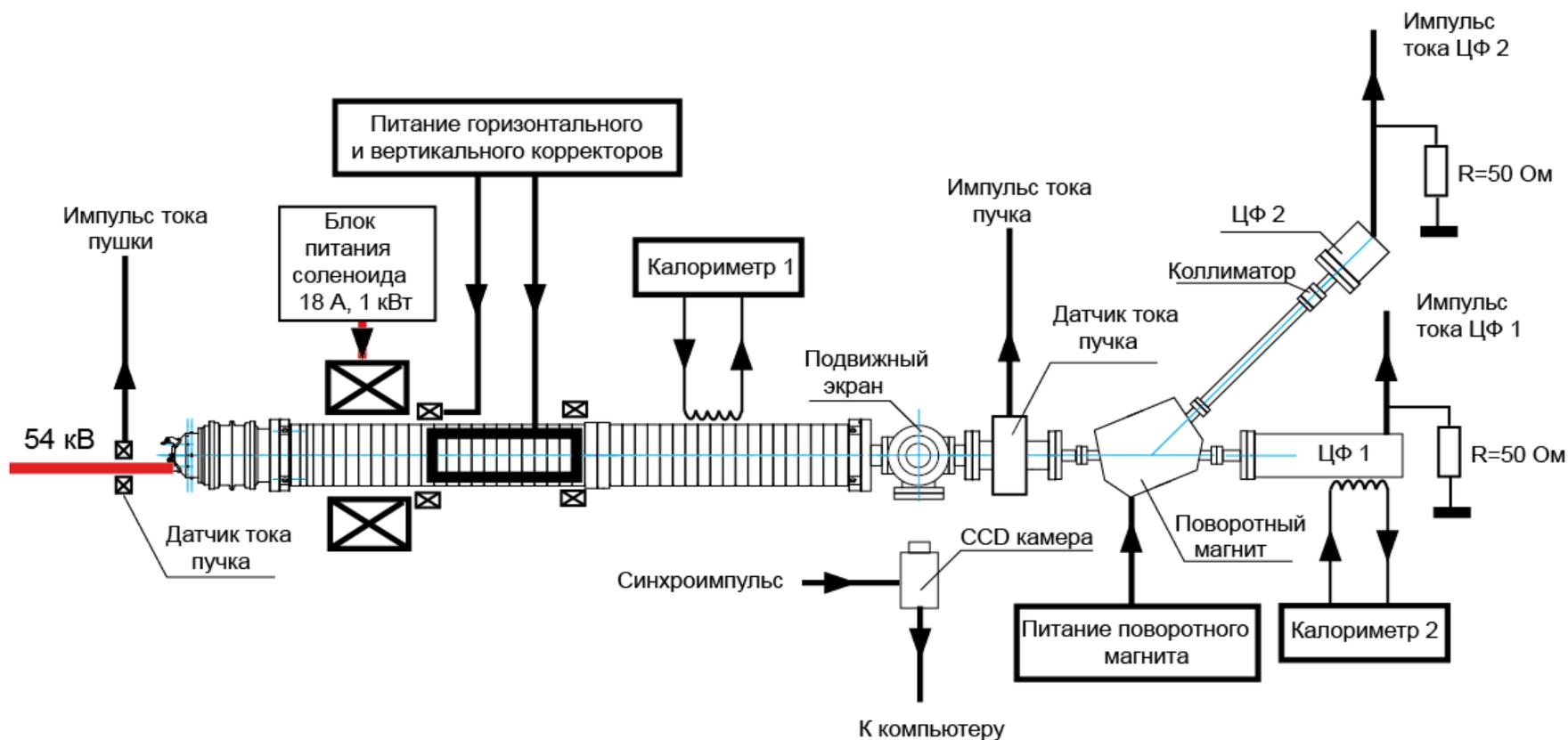
# Система СВЧ питания



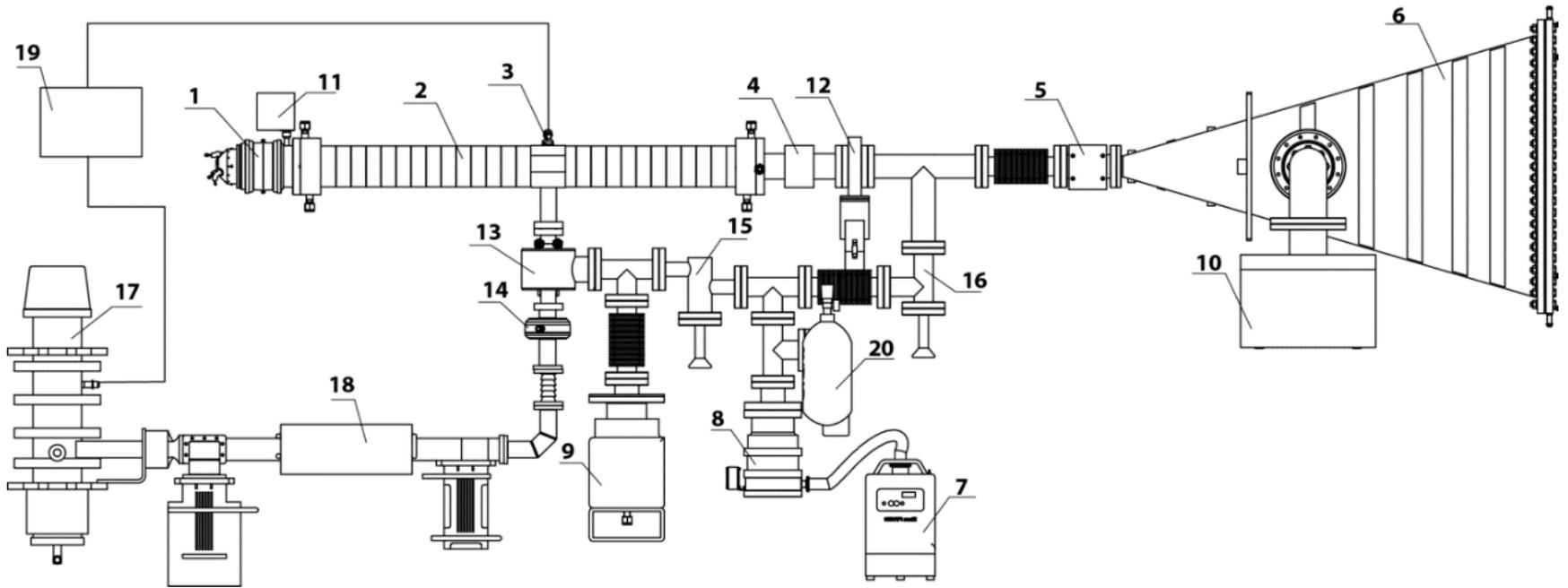
# Система высоковольтного питания



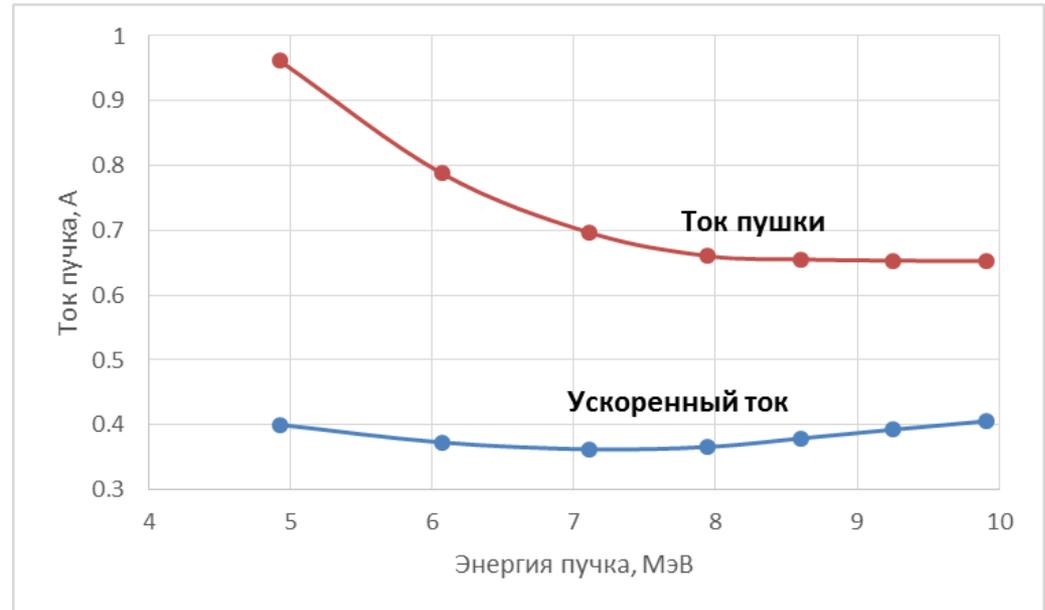
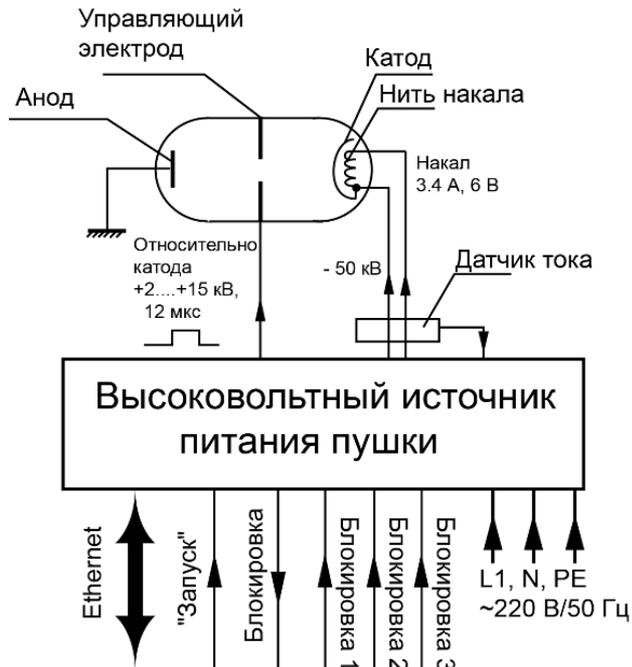
# Система измерения параметров ускоренного пучка стенда №1



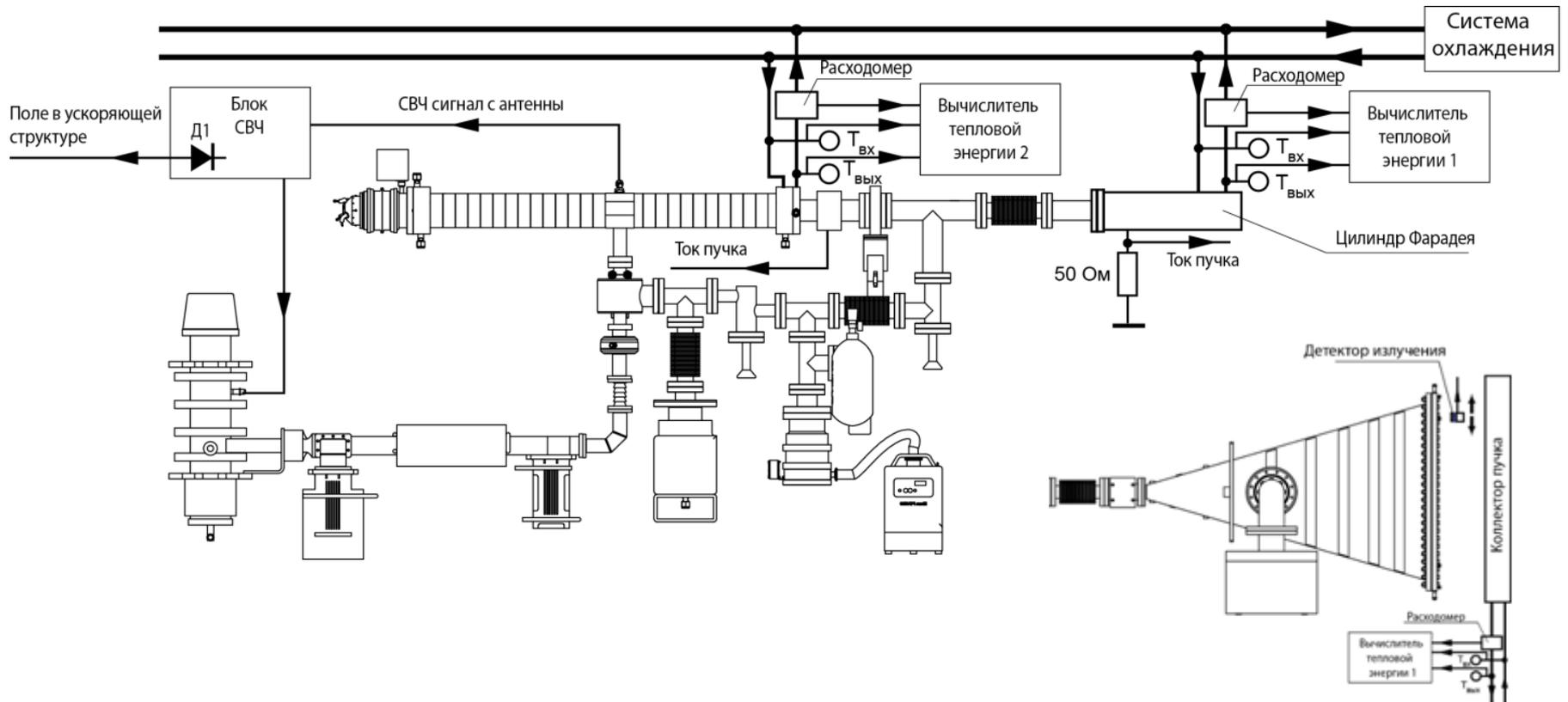
# Стенд №2



# Система высоковольтного питания

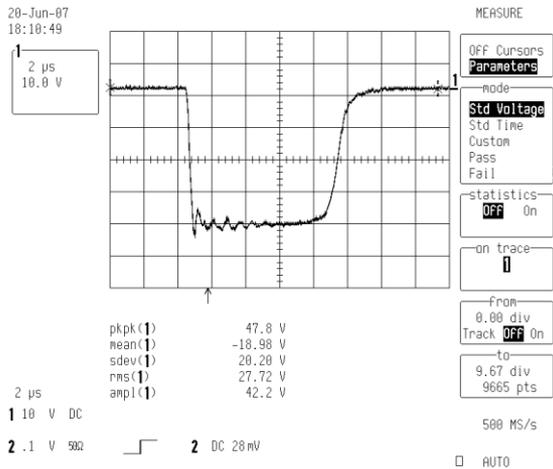


# Система измерения характеристик пучка стенда №2

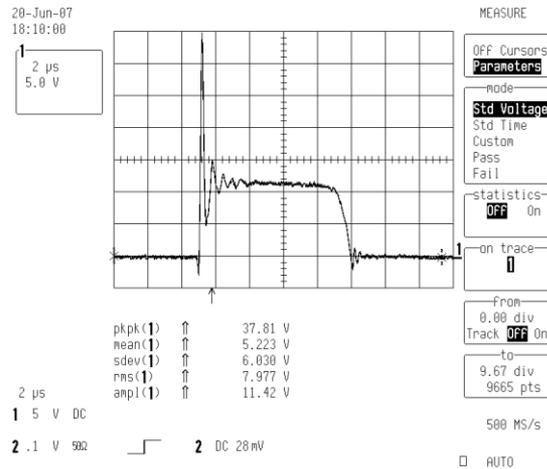


# Стенд №1, импульсные сигналы

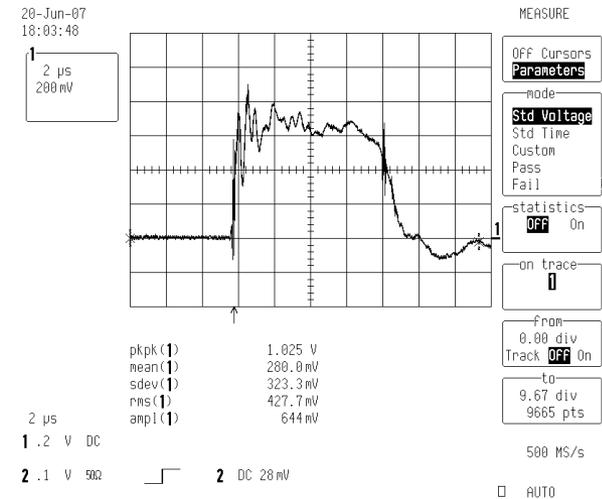
## Высокое напряжение на клистроне



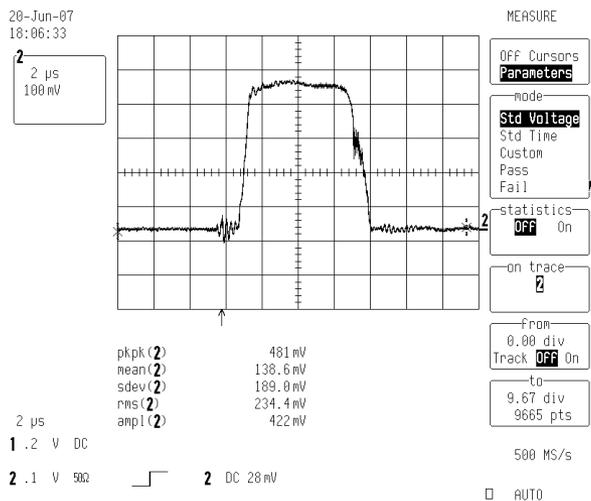
## Тока клистрона



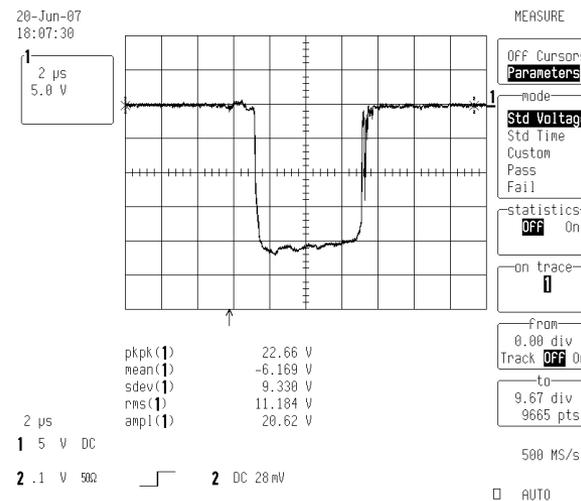
## Ток пушки



## Огибающая СВЧ поля в структуре

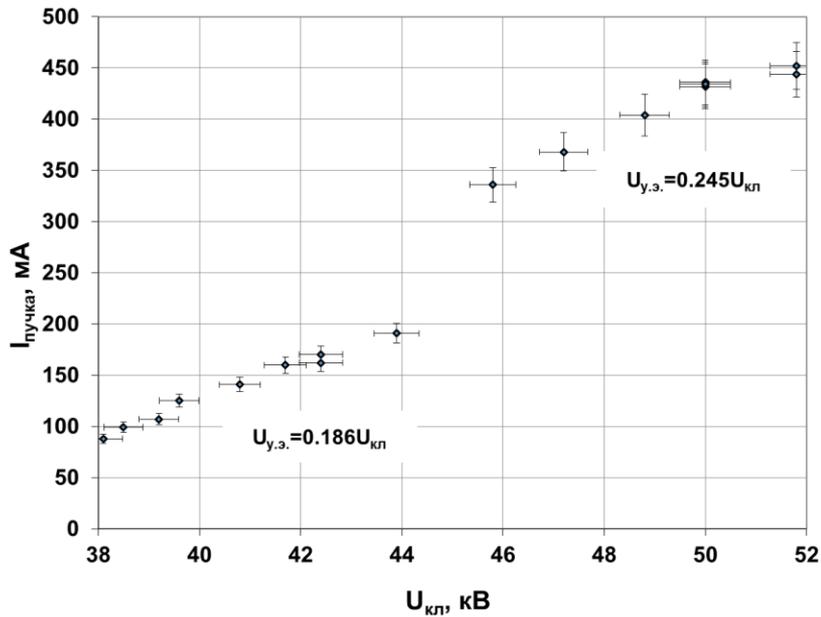


## Ток коллектора

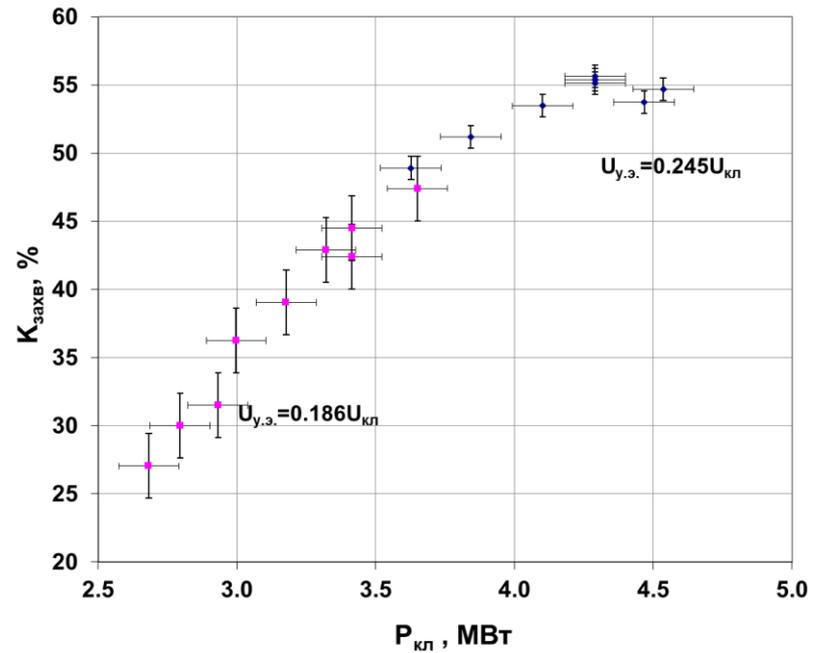


# Стенд №1, коэффициент захвата

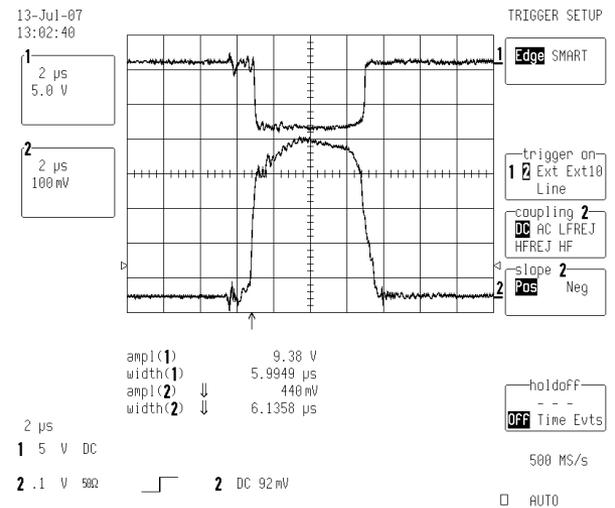
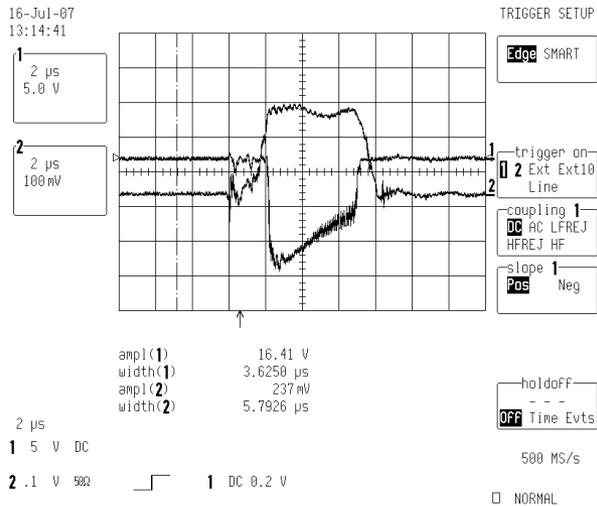
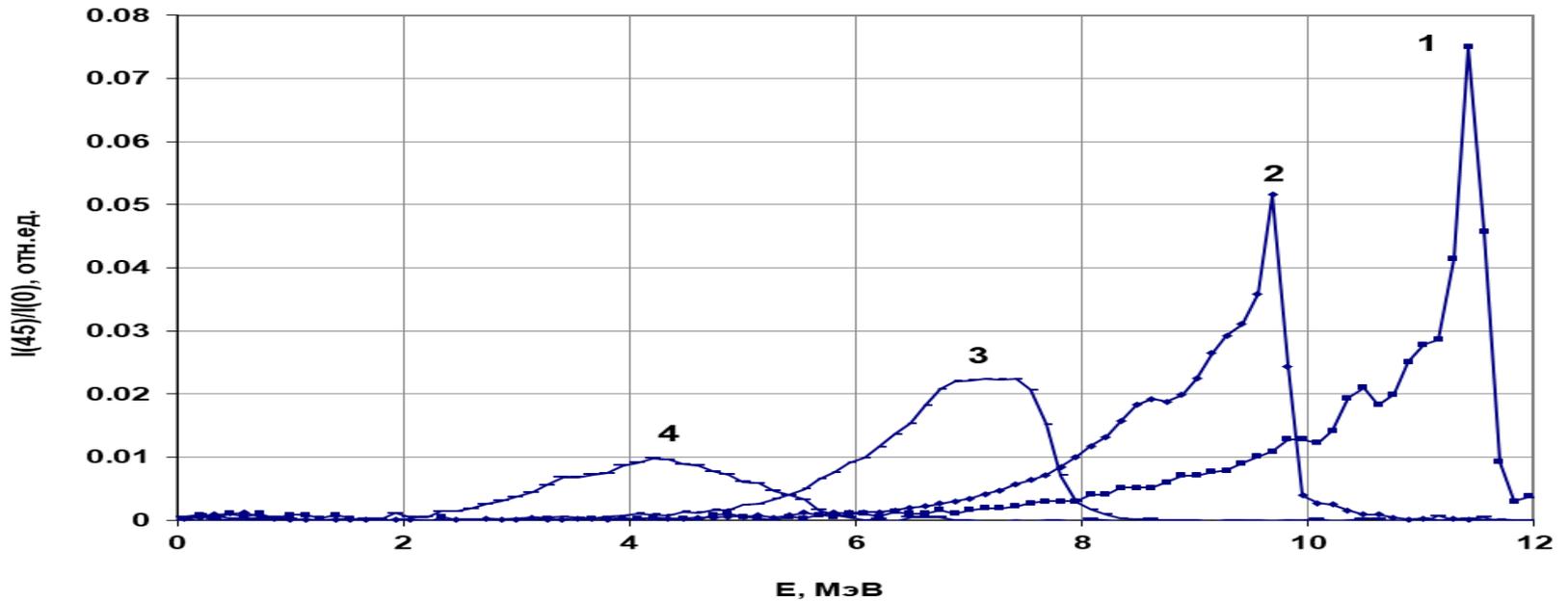
Зависимость ускоренного тока от амплитуды импульса напряжения модулятора



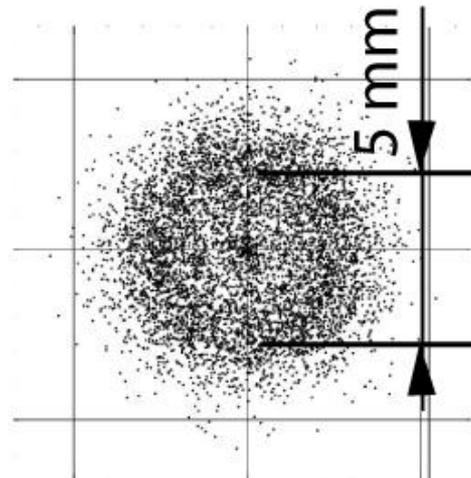
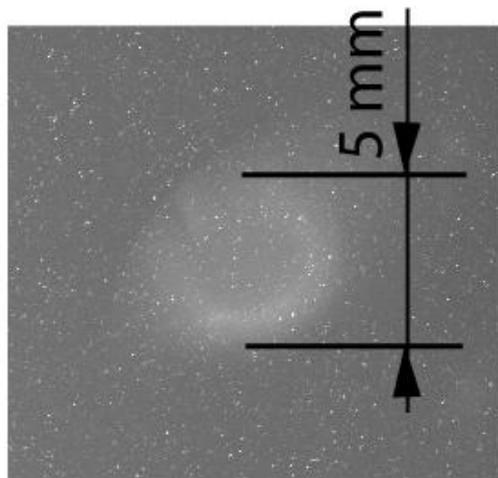
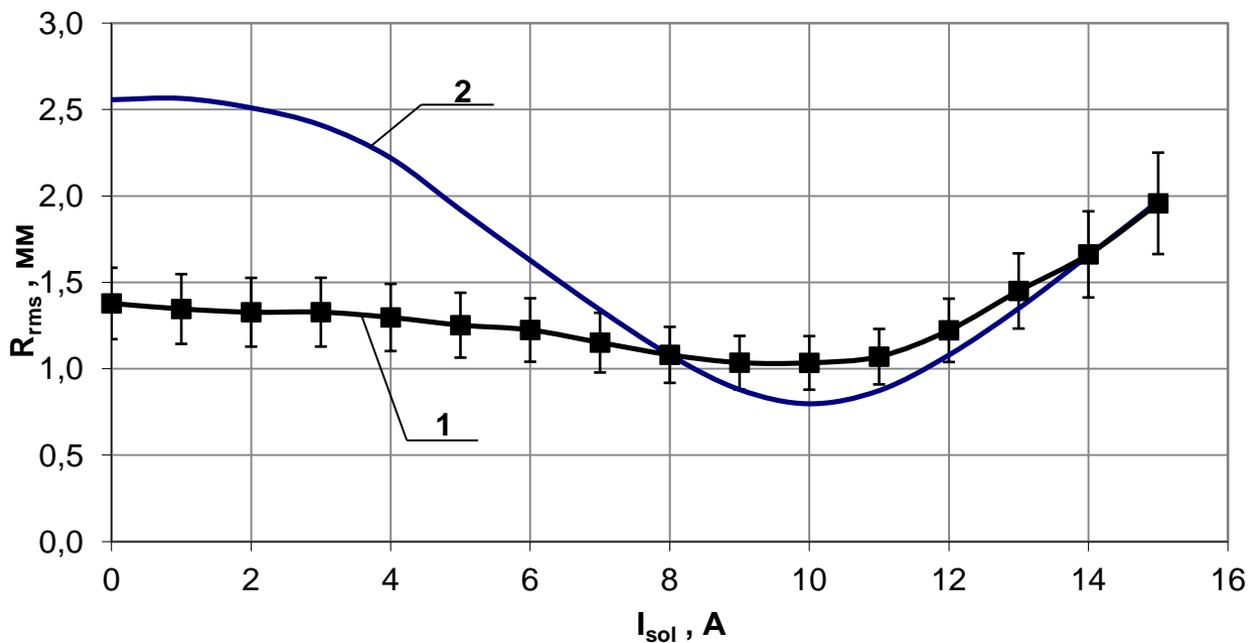
Зависимость коэффициента захвата от импульсной мощности клистрона



# Стенд №1, спектры

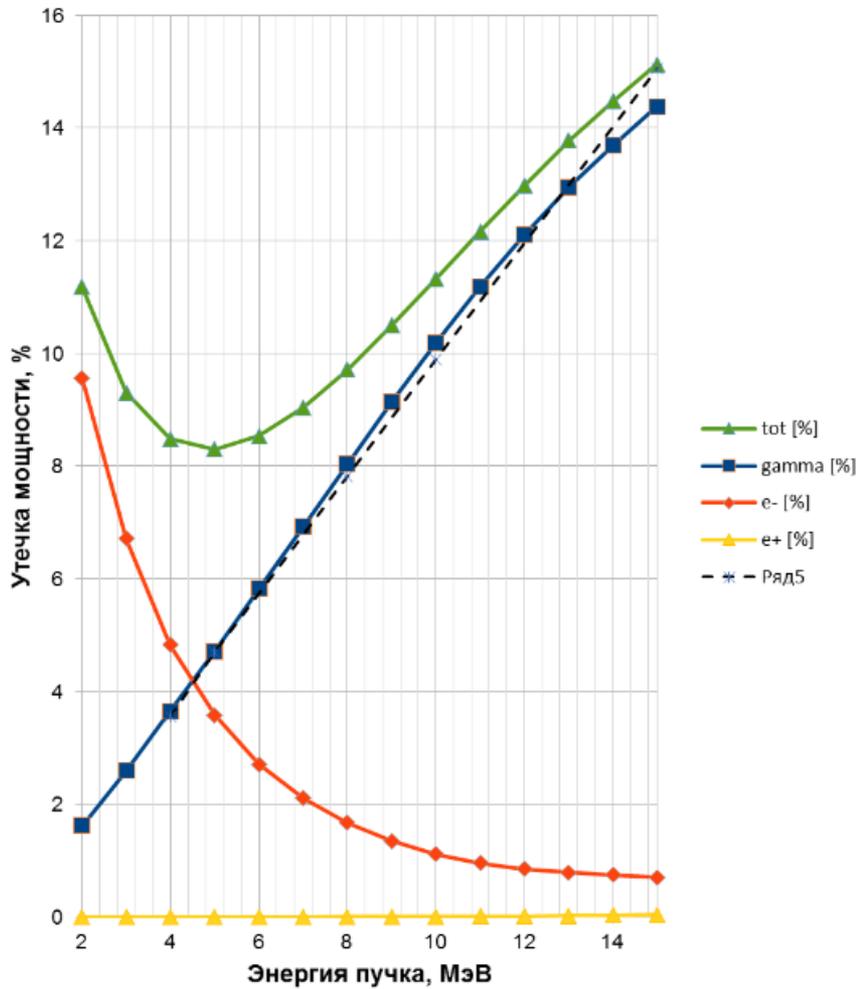


# Стенд №1, распределение заряда в поперечной плоскости

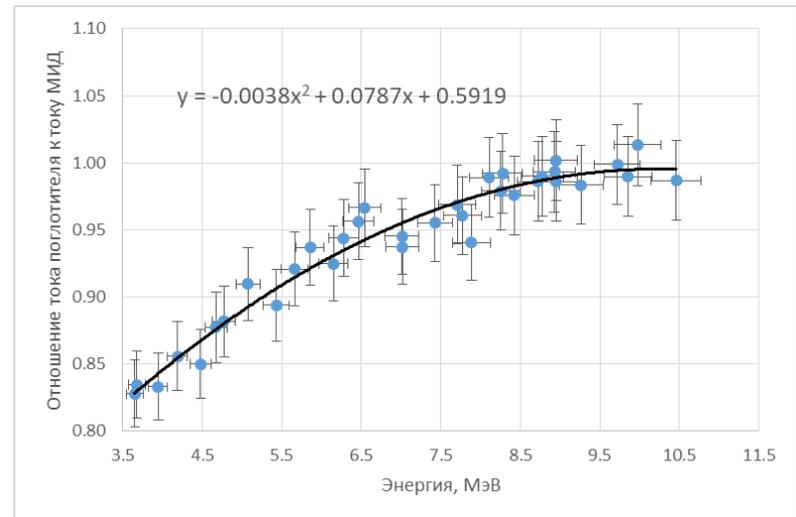
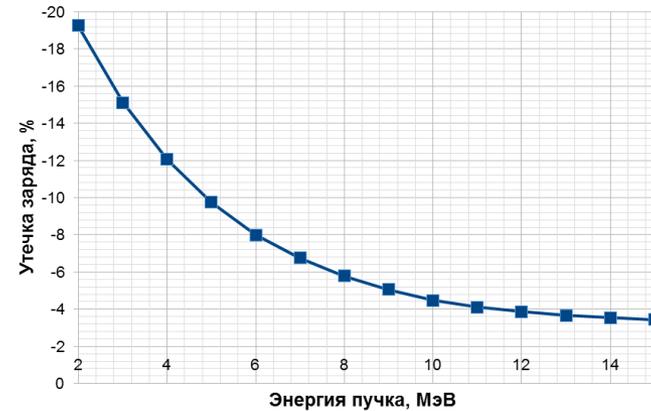


# Стенд №2, калориметрические измерения

## Утечка мощности

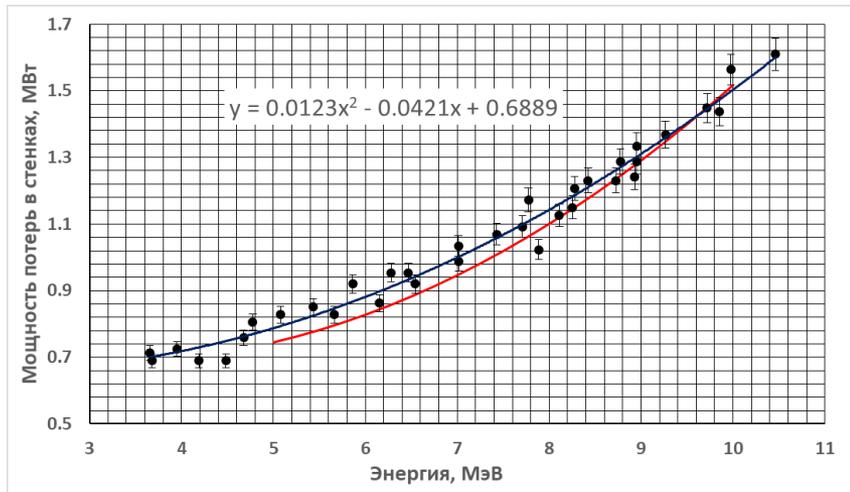


## Утечка заряда

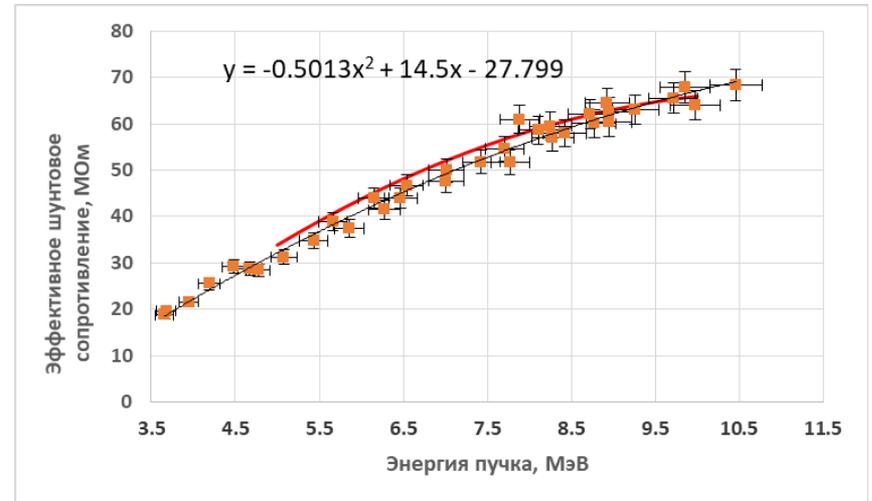


## Стенд №2, калориметрические измерения

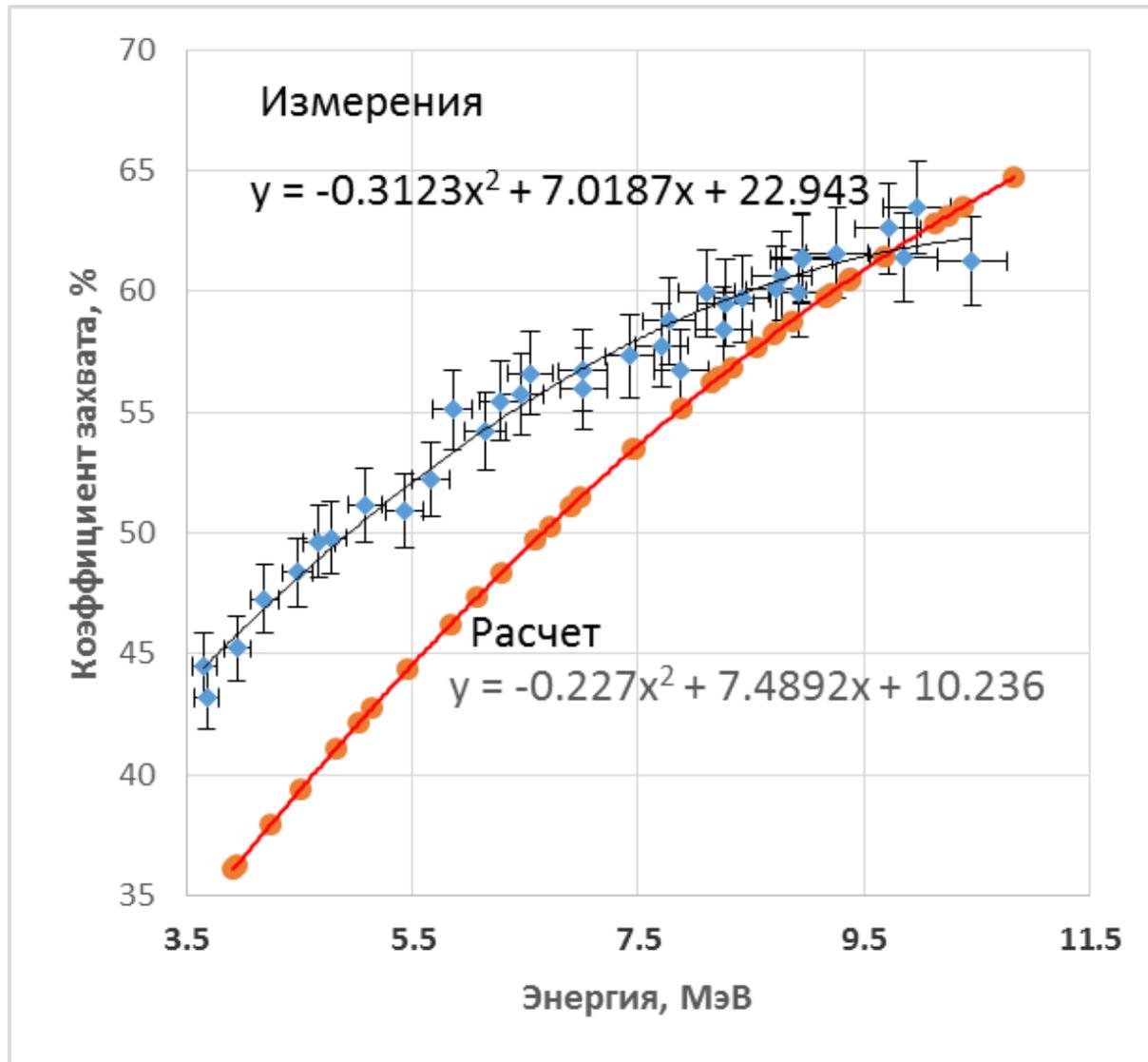
**Связь энергии ускоренного пучка и импульсных СВЧ потерь в стенках структуры**



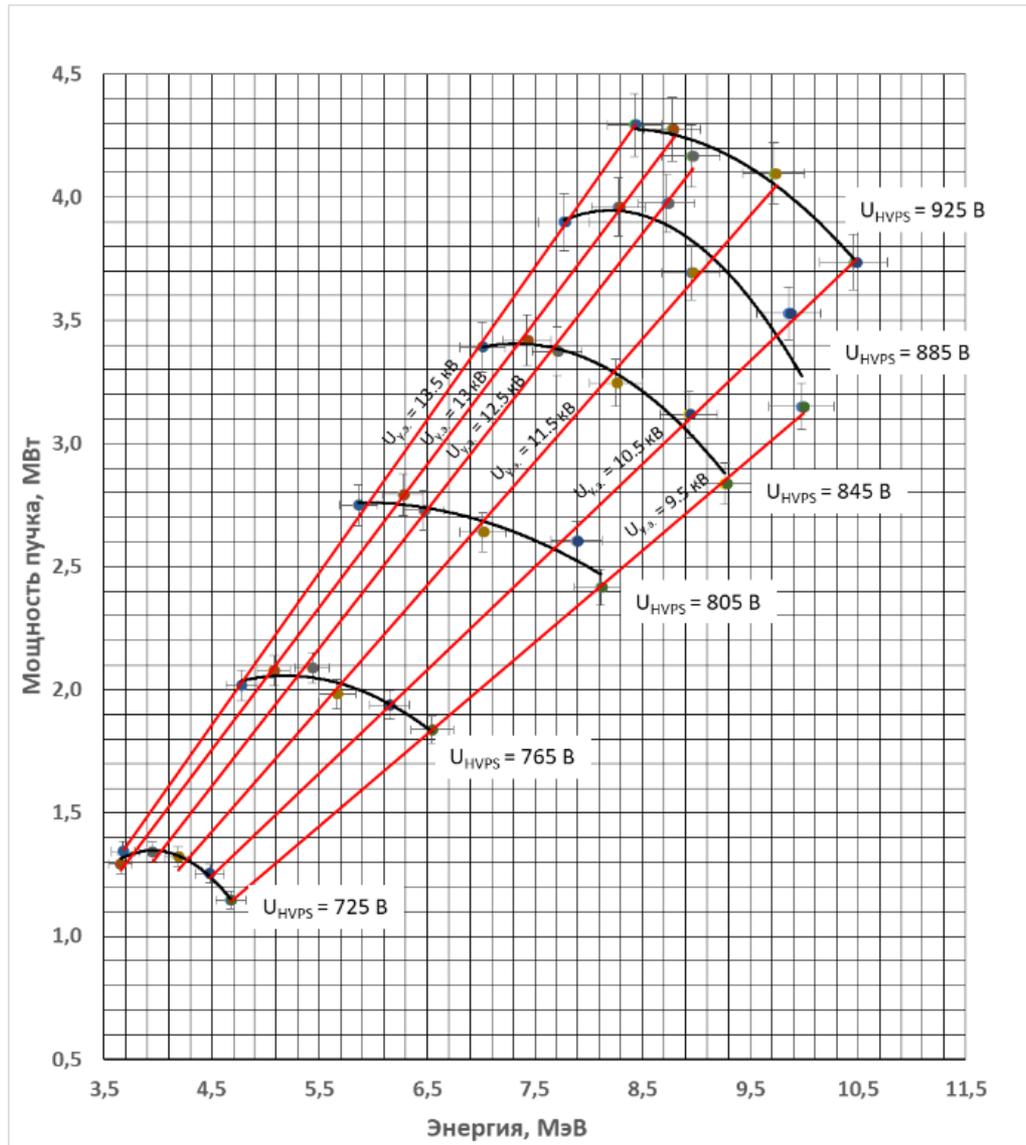
**Зависимость эффективного шунтового сопротивления от энергии**



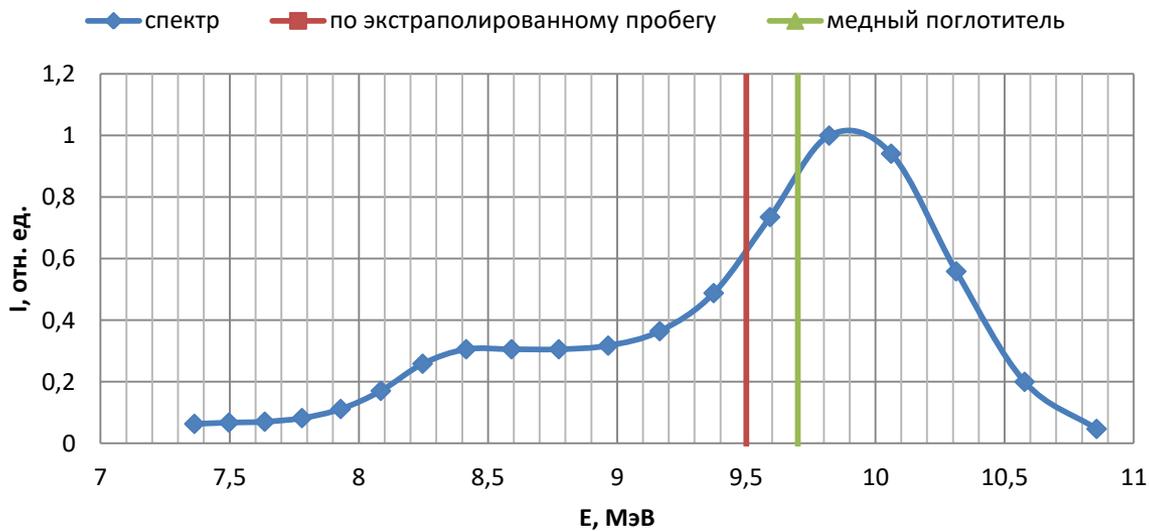
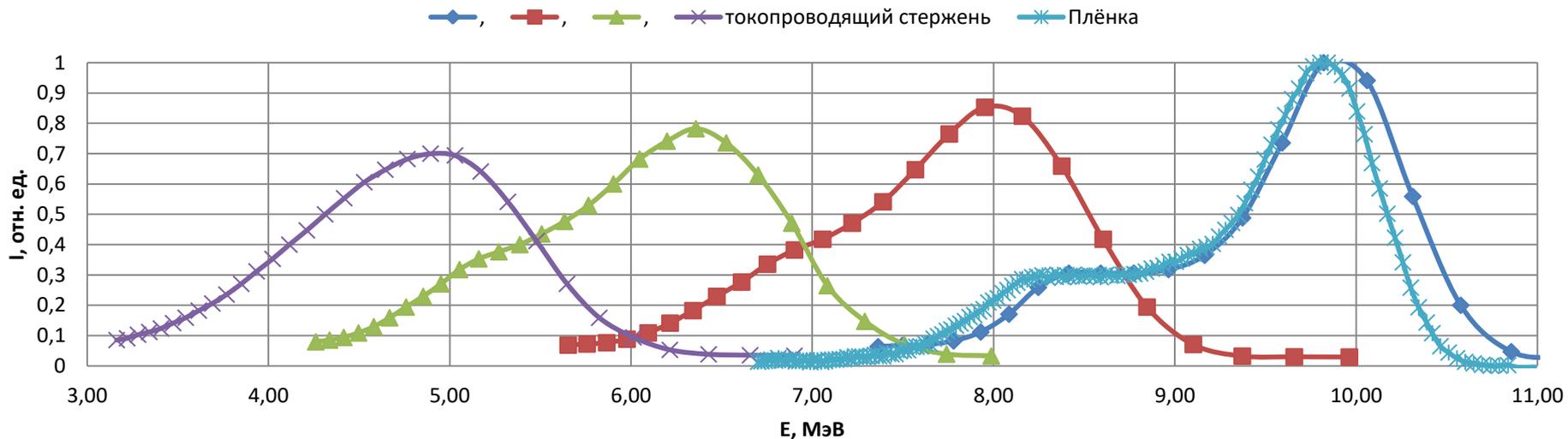
## Стенд №2, коэффициент захвата



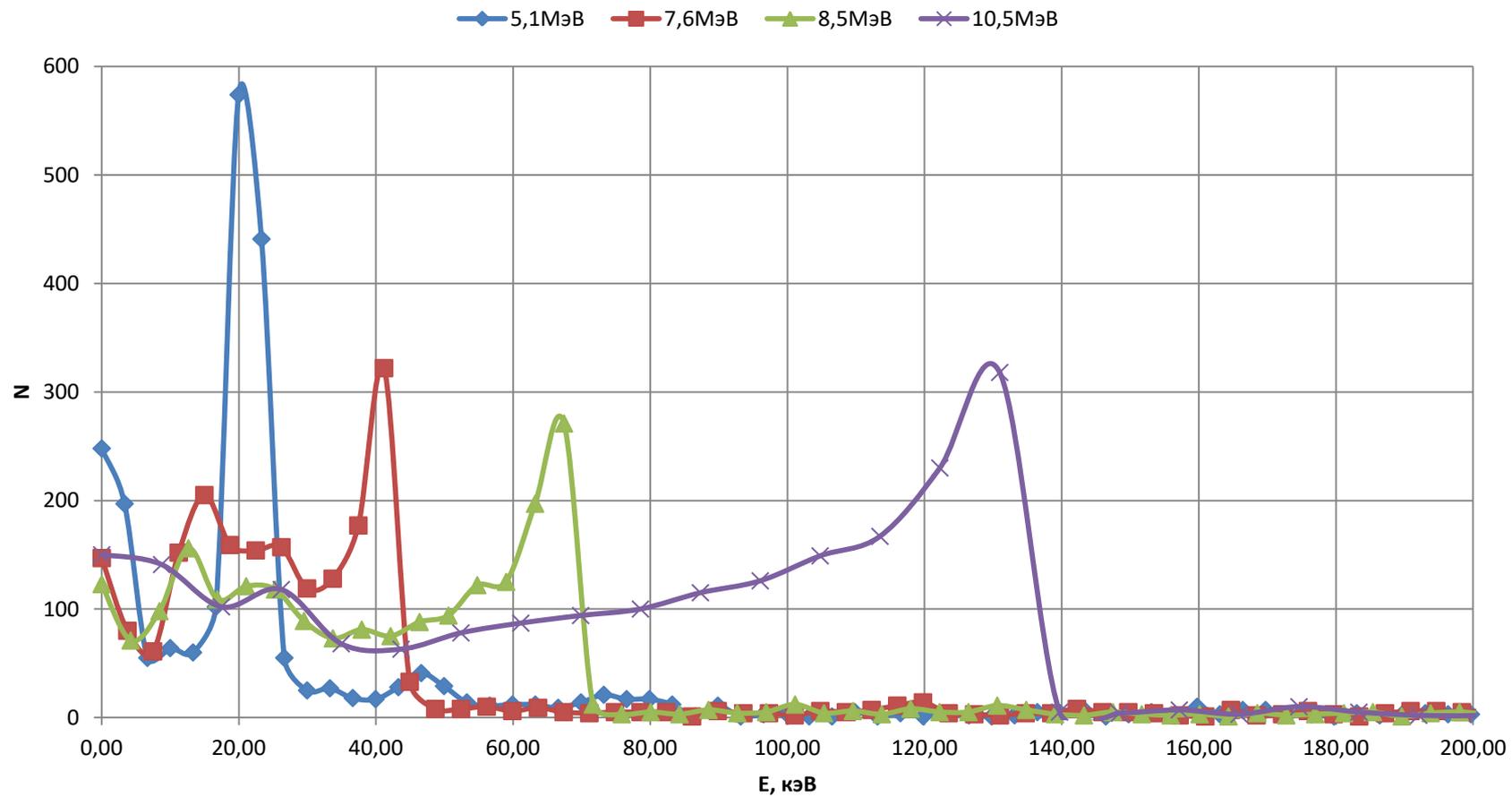
# Стенд №2, рабочие режимы



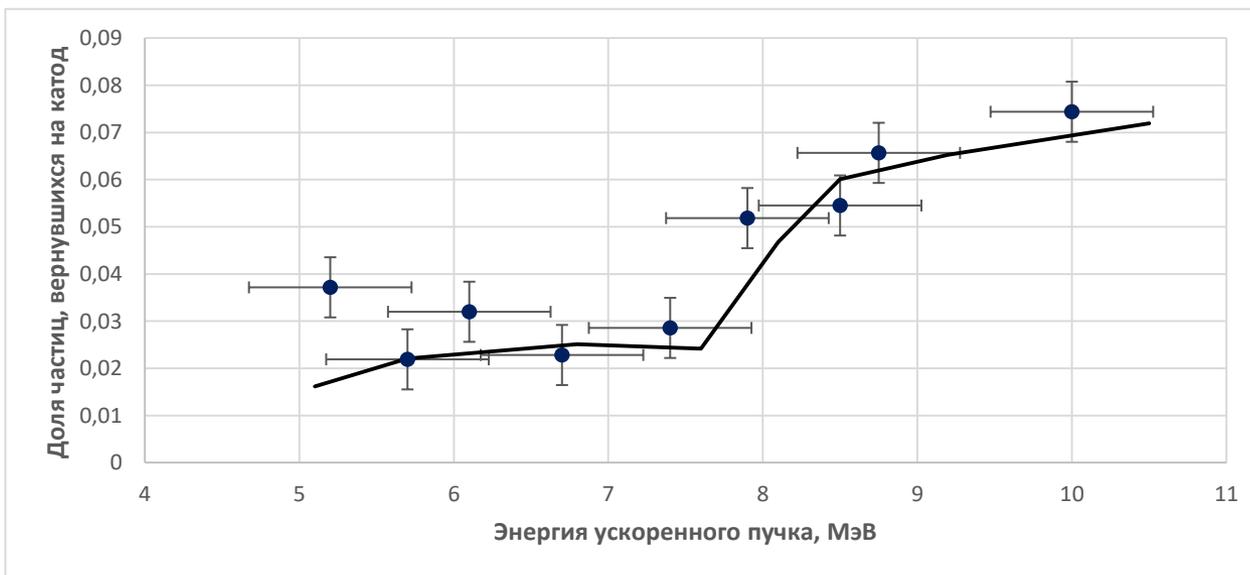
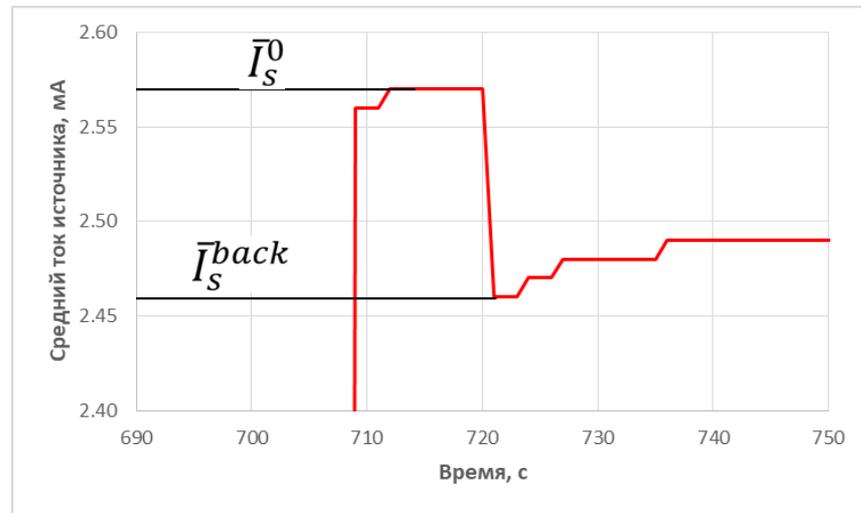
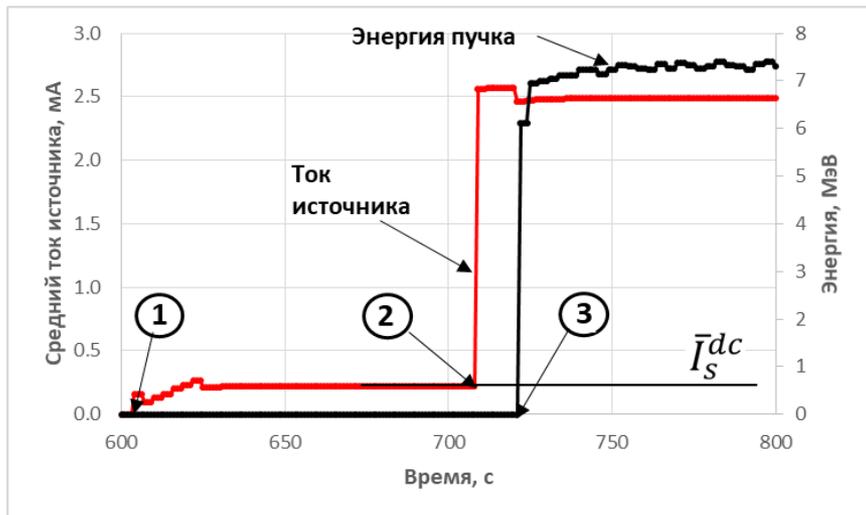
# Стенд №2, спектры



# Обратная бомбардировка



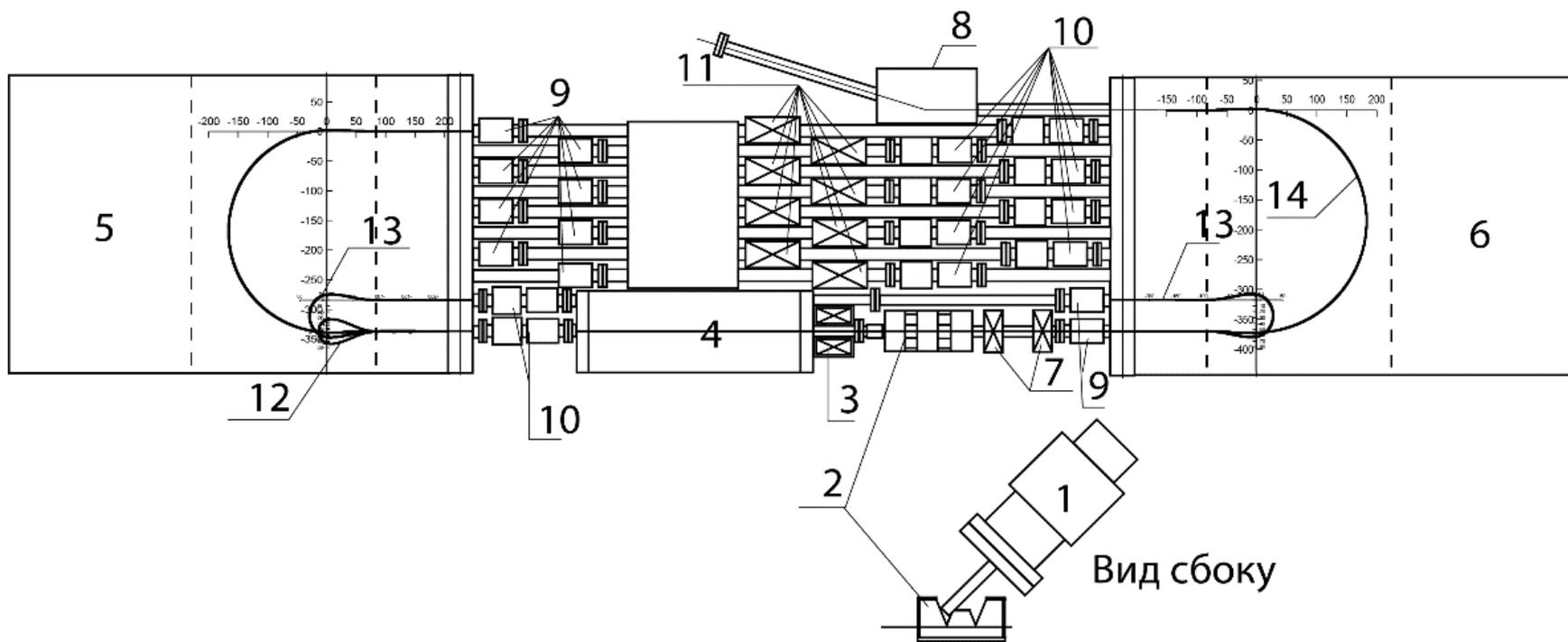
# Обратная бомбардировка



## Применение разработанного ускорителя в радиационных технологиях

- Продемонстрирована возможность поимпульсного переключения энергии, что позволило приступить к разработке специализированных ускорителей для ИДК
- Многочисленные исследования в области материаловедения
- Создана установка для калибровки детекторов электронов, работающих в счётном режиме
- результаты исследований, проведённых на стенде 2, легли в основу ускорителя для радиационных технологий, разработанного ЛЭУ МГУ и выпускаемого совместно с АО «НПП «Торий»

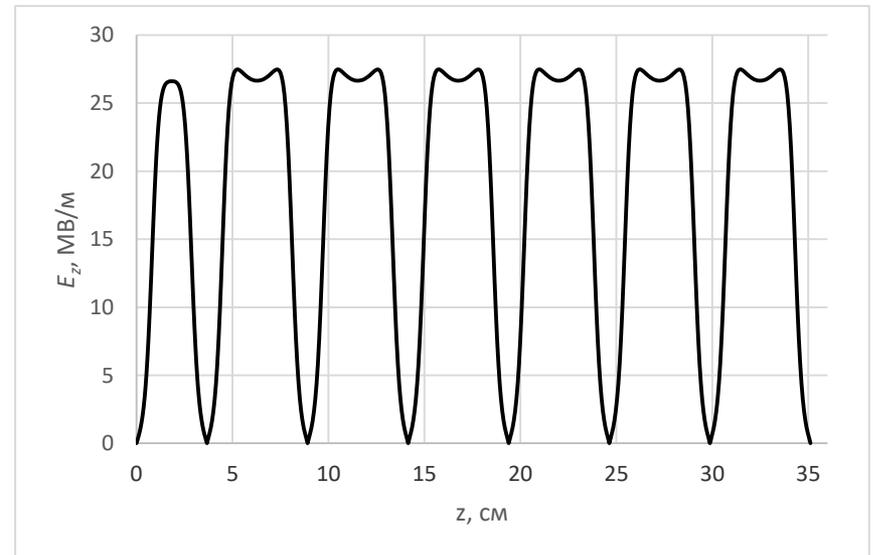
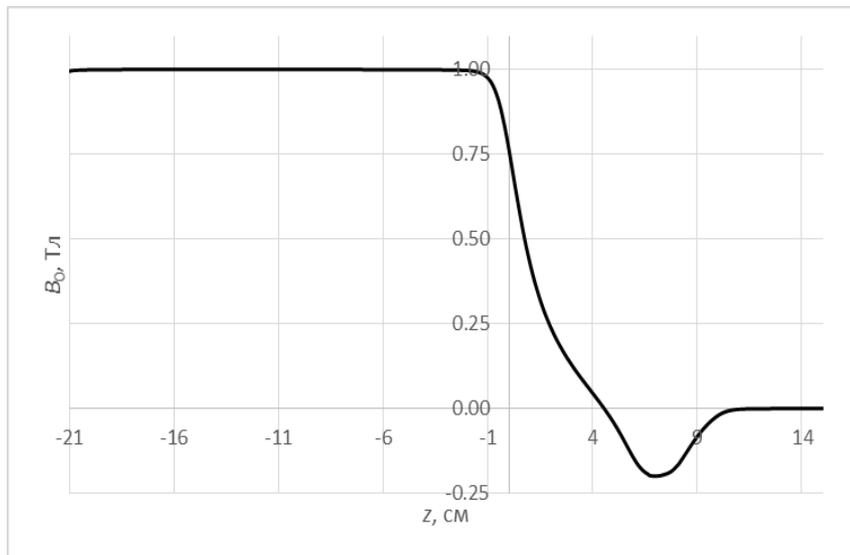
# Стенд импульсного разрезного микротрона на энергию 55МэВ



## PM, расчёт

$$B_0 = \frac{2\pi\Delta E_s}{\nu c\lambda}$$

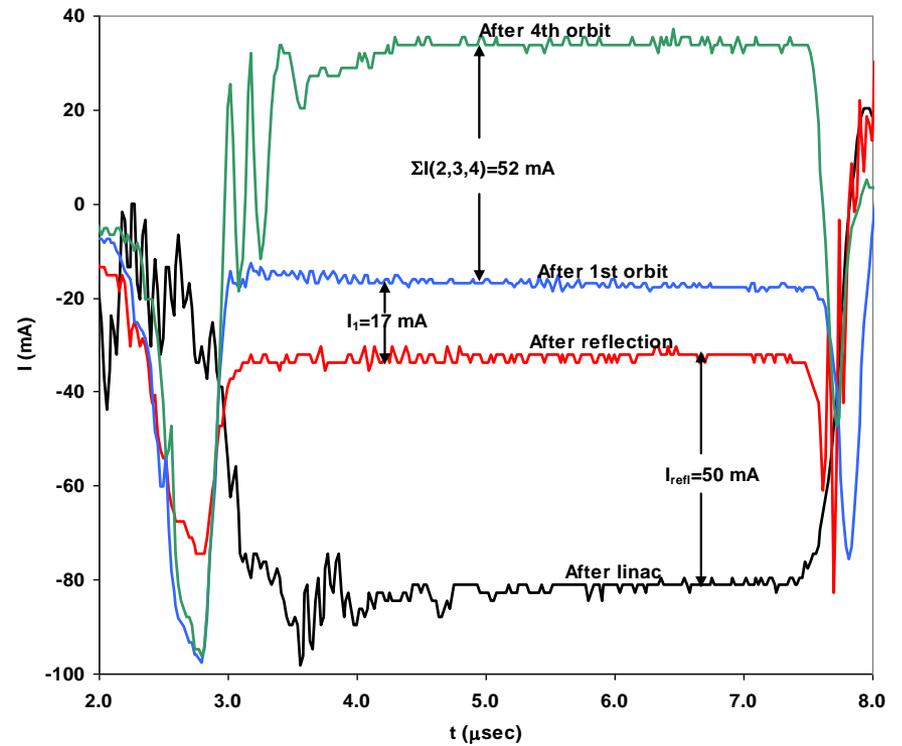
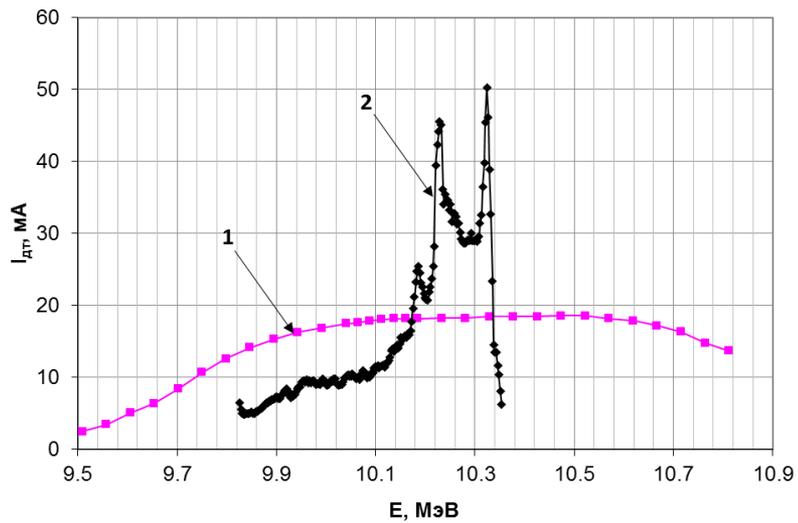
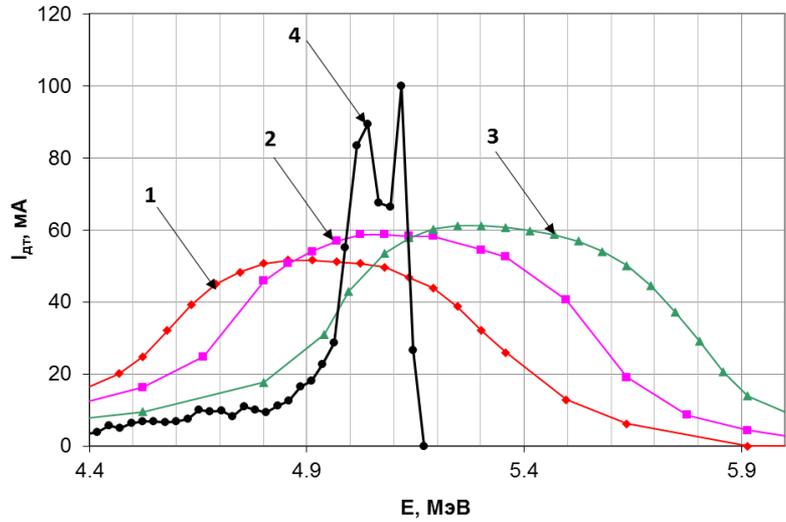
$B_0=1\text{Тл}$  – индукция поля поворотных магнитов,  
 $\Delta E_s=5\text{МэВ}$  – равновесный прирост энергии,  
 $\nu=1$  - кратность прироста длины орбиты за оборот  
длине волны ускоряющего поля  
 $\lambda\approx 0,105\text{м}$  - длина волны ускоряющего поля  
 $\varphi_s \approx 16^\circ$  - равновесная фаза



## Стенд импульсного разрезного микротрона

Энергия электронов на выходе	55.52 МэВ
Ток ускоренного пучка	10 мА
Длительность импульса	8 мкс
Максимальная частота следования импульсов	50 Гц
Прирост энергии за оборот	5 МэВ
Число проходов через линейный ускоритель	11
Рабочая частота	2856 МГц
Потребляемая СВЧ мощность	2.5 МВт
Магнитное поле поворотных магнитов	1 Тл
Энергетический разброс	83.919кэВ
Размеры пучка $x/y$	1.7488 / 1.7178мм
Продольный эмиттанс	366.98кэВ град
Поперечный нормализованный эмиттанс	9.706/ 27.530мм мрад

# РМ, методика настройки



## Применение стенда разрезного микротрона

- Исследования в области методики детектирования скрытых взрывчатых веществ
- Исследования возможности наработки ПЭТ изотопов
- Фундаментальные исследования в области ядерной физики

# Основные положения выносимые на защиту

1. Результаты создания стендов линейного ускорителя на энергию 10 МэВ.
2. Методику измерения характеристик пучка линейного ускорителя на энергию 10 МэВ.
3. Результаты измерения и анализа характеристик пучка линейного ускорителя на энергию 10 МэВ.
4. Методику и результаты настройки линейного ускорителя на энергию 10 МэВ, обеспечивающие работу ускорителя с изменением параметров пучка в широком диапазоне.
5. Методики прикладных исследований на линейном ускорителе.
6. Результаты создания стенда разрезного микротрона на энергию 55 МэВ.
7. Методику измерения характеристик пучка разрезного микротрона на энергию 55 МэВ.
8. Методику и результаты настройки разрезного микротрона на энергию 55 МэВ.
9. Методики прикладных исследований на разрезном микротроне.

# Публикации

1. Studying photonuclear reactions using the activation technique, Belyshev S.S., Ermakov A.N., Ishkhanov B.S., Khankin V.V., Kurilik A.S., Kuznetsov A.A., Shvedunov V.I., Stopani K.A. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, Elsevier BV (Netherlands), том 745, с. 133-137
2. Многоцелевой импульсный разрезной микротрон на энергию 55 МэВ, Ермаков А.Н., Ишханов Б.С., Ханкин В.В., Шведунов В.И., Карев А.И., Пахомов Н.И., Собенин Н.П., Шведунов Н.В., Каманин А.Н., Журавлев Е.Е. Приборы и техника эксперимента, ИКЦ «Академкнига» (Москва), № 2, с. 20-37
3. Electron accelerators design and construction at Lomonosov Moscow State University, Shvedunov V.I., Alimov A.S., Ermakov A.N., Kamanin A.N., Khankin V.V., Kurilik A.S., Ovchinnikova L.Yu, Pakhomov N.I., Shvedunov N.V., Yurov D.S., Shvedunov I.V., Simonov A.S. Radiation Physics and Chemistry, Elsevier (United States), том 159, с. 95-100
4. Фотоядерная технология обнаружения скрытых взрывчатых веществ, Журавлев Е.Е., Карев А.И., Лопатко В.Б., Ханкин В.В., Черепня С.Н., Шведунов В.И. Ядерная физика и инжиниринг, издательство НИЯУ МИФИ (Москва), том 8, № 4, с. 336-343
5. Исследование возможностей получения и выделения радиоизотопа  $^{18}\text{F}$  на ускорителях электронов, Алиев Р.А., Бельшев С.С., Джилавян Л.З., Ишханов Б.С., Ханкин В.В., Шведунов В.И. Вестник Московского университета. Серия 3: Физика, астрономия, Изд-во Моск. ун-та (М.), № 3
6. Фотоядерные реакции на р-нуклидах  $^{106}\text{Cd}$ ,  $^{108}\text{Cd}$  при верхней границе тормозного спектра 55.5 МэВ, Бельшев С.С., Кузнецов А.А., Стопани К.А., Ханкин В.В. Ядерная физика, Наука (М.), том 79, № 05, с. 431-437
7. Фотоядерное получение радионуклидов без носителя:  $\text{Zn-69m}$ , Алиев Р.А., Алешин Г.Ю., Бельшев С.С., Ишханов Б.С., Приселкова А.Б., Ханкин В.В., Пожарская В.Ю., Орлова М.А., Калмыков С.Н. Известия Академии наук. Серия химическая, Наука (М.), № 2, с. 368-372
8. Изоспиновое расщепление ГДР и фотопротонные реакции на изотопах олова, Бельшев С.С., Бувина Ю.А., Ишханов Б.С., Кузнецов А.А., Орлин В.Н., Стопани К.А., Ханкин В.В. Известия Российской академии наук. Серия физическая, том 82, № 6, с. 687-692

# Доклады на конференции

1. Beam Parameters Measurement Of Technological 10 MeV Linac, Alimov A.S., Alimov E.A., Каманин А.Н., Ханкин В.В., Sigalaev V.N., Шведунув В.И., Gryzlov A.V., Ламонов С.В., Мусатов А.П., Пахомов Е.И. XXI Российская конференция по ускорителям заряженных частиц RuPAC-2008, г. Звенигород, Россия, Россия, 2008
2. 55 MeV special purpose race-track microtron commissioning, Karev A.I., Lebedev A.N., Raevsky V.G., Ермаков А.Н., Каманин А.Н., Wilhide L., Пахомов Н.И., Шведунув В.И., Собенин Н.П., Brothers L., Ханкин В.В. XXII Russian Particle Accelerator Conference RuPAC-2010, г. Протвино, Московская область, 2010
3. Operational Experience with 55 MeV Pulsed RTM, Пахомов Е.И., Шведунув В.И., Karev A.I., Ханкин В.В., Raevsky V.G. RUPAC2012, Saint-Petersburg, Russia, Россия, 2012
4. Планирование облучения и регулирование параметров технологического ускорителя на энергию 10 МэВ, Ханкин В.В., Ермаков А.Н., Курилик А.С., Шведунув В.И. III Международная конференция "Лазерные, плазменные исследования и технологии ЛаПлаз-2017", Москва, Россия, 24-27 января 2017
5. Результаты проведения пусковых работ мощного промышленного ускорителя, Ермаков А.Н., Юров Д.С., Шведунув В.И., Ханкин В.В., Овчинникова Л.Ю. Ломоносовские чтения-2018, секция "Ядерная физика", МГУ имени М.В. Ломоносова, Россия, Россия, 16-24 апреля 2018
6. Linear Electron Accelerator for Radiation Technologies with Beam Parameters Varied in a Wide Range, Khankin V.V., Alimov A.S., Ermakov A.N., Kamanin A.N., Kurilik A.S., Pakhomov N.I., Shvedunov N.V., Shvedunov V.I., Yurov D.S., Shvedunov I.V., Simonov A.S. 29th Linear Accelerator Conference LINAC18, Beijing, Китай, 16-21 сентября 2018