

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова

Физический факультет • НИИЯФ им. Д.В. Скобельцына

Кафедра общей ядерной физики

ЗАПУСК И НАСТРОЙКА СИСТЕМ ИНЖЕКЦИИ И СВЧ-ПИТАНИЯ СТЕНДА ЛИНЕЙНОГО УСКОРИТЕЛЯ ИМПУЛЬСНОГО ДЕЙСТВИЯ НА ЭНЕРГИЮ ЭЛЕКТРОНОВ 35 МэВ

Дипломная работа студента 613 группы

Басати В.К.

Москва, 2026

Актуальность работы и цели исследования

Линейные ускорители электронов — один из ключевых инструментов ядерной физики

Фундаментальные исследования: фотоядерные реакции методом наведённой активности

Стенд ускорителя электронов на 35 МэВ в НИИЯФ МГУ — электронный импульсный линак, две ускоряющие секции

Задача исследования: запуск и настройка систем инжекции и СВЧ

Без надёжной работы этих систем невозможно получение стабильного пучка

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Запуск и настройка систем инжекции и СВЧ-питания стенда линейного ускорителя с выводом пучка на 35 МэВ и регистрацией энергетических спектров

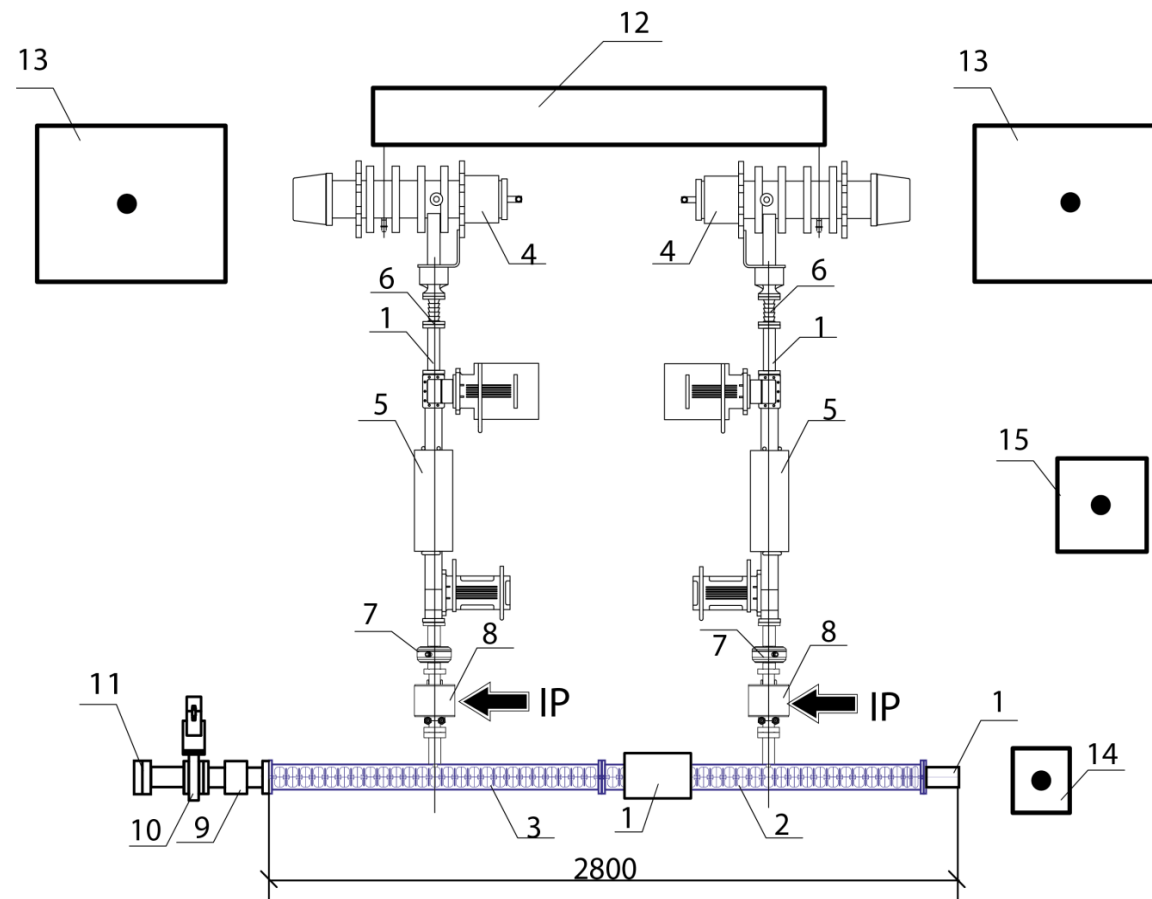


Рис. 1. Внешний вид и общая схема линейного ускорителя: 1 – электронная пушка с термокатодом, 2 – секция нерегулярной ускоряющей структуры, 3 – секция регулярной ускоряющей структуры, 4 – клистрон, 5 – ферритовый вентиль, 6 – гибкий волновод, 7 – вакуумное СВЧ окно, 8 – узел откачки, 9 – датчик тока пучка, 10 – вакуумный затвор, 11 – выходное окно, 12 – СВЧ система низкого уровня мощности, 13 – высоковольтный модулятор клистрона, 14 – высоковольтный модулятор пушки, 15 – система контроля и управления.

Система инжекции

Термокатодная электронная пушка

Активировка: прогрев в вакууме, контроль по току магниторазрядных насосов

Ток накала: 5 А | **Напряжение на катоде:** -40 кВ

Длительность импульса: до 10 мкс | **Частота:** до 200 Гц

Ток пушки: 150 мА

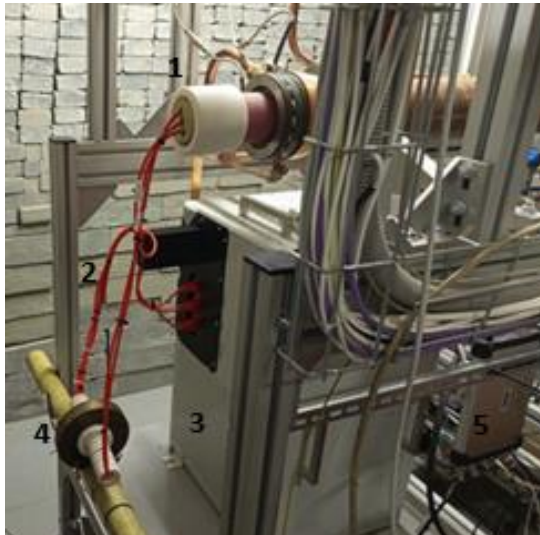


Рис. 2. Внешний вид электронной пушки и ее положение на стенде ускорителя.

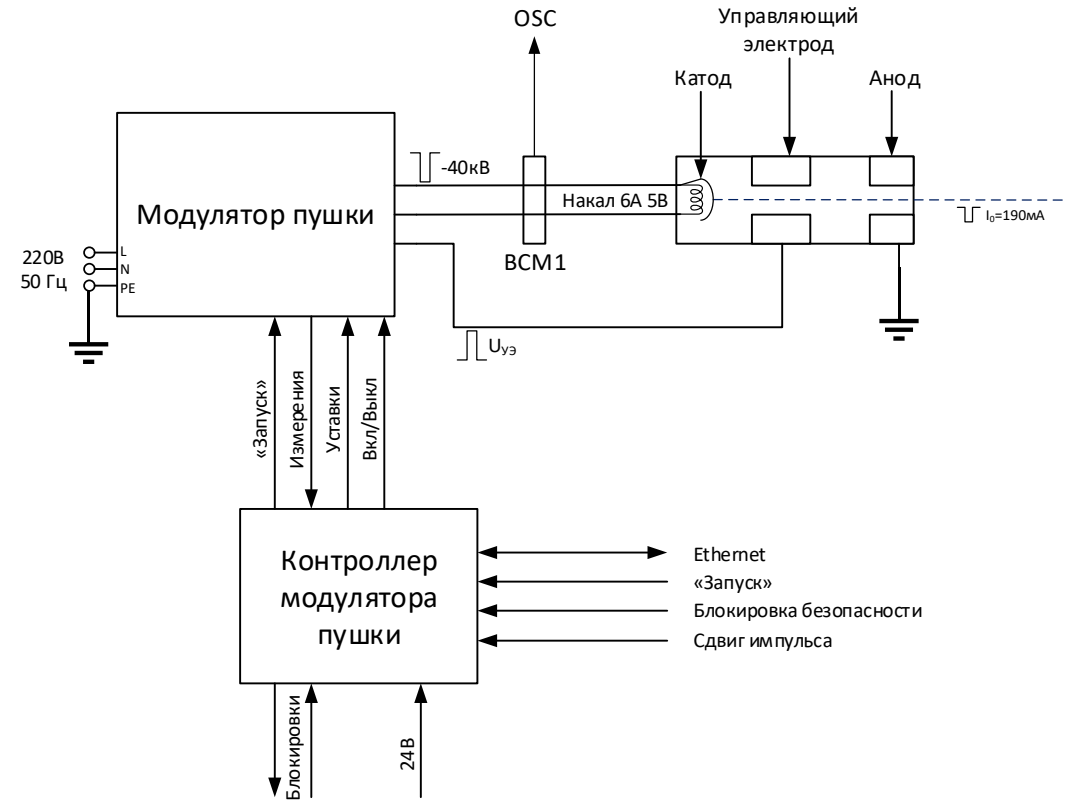


Рис. 2. Схема системы инжекции.

Система инжекции

Термокатодная электронная пушка

Активировка: прогрев в вакууме, контроль по току МРГ

Ток накала: 5 А | Напряжение на катоде: -40 кВ

Напряжение на управляющем электроде: 1-3 кВ

Длительность импульса: до 10 мкс | Частота: до 200 Гц

Ток пушки: 150 мА

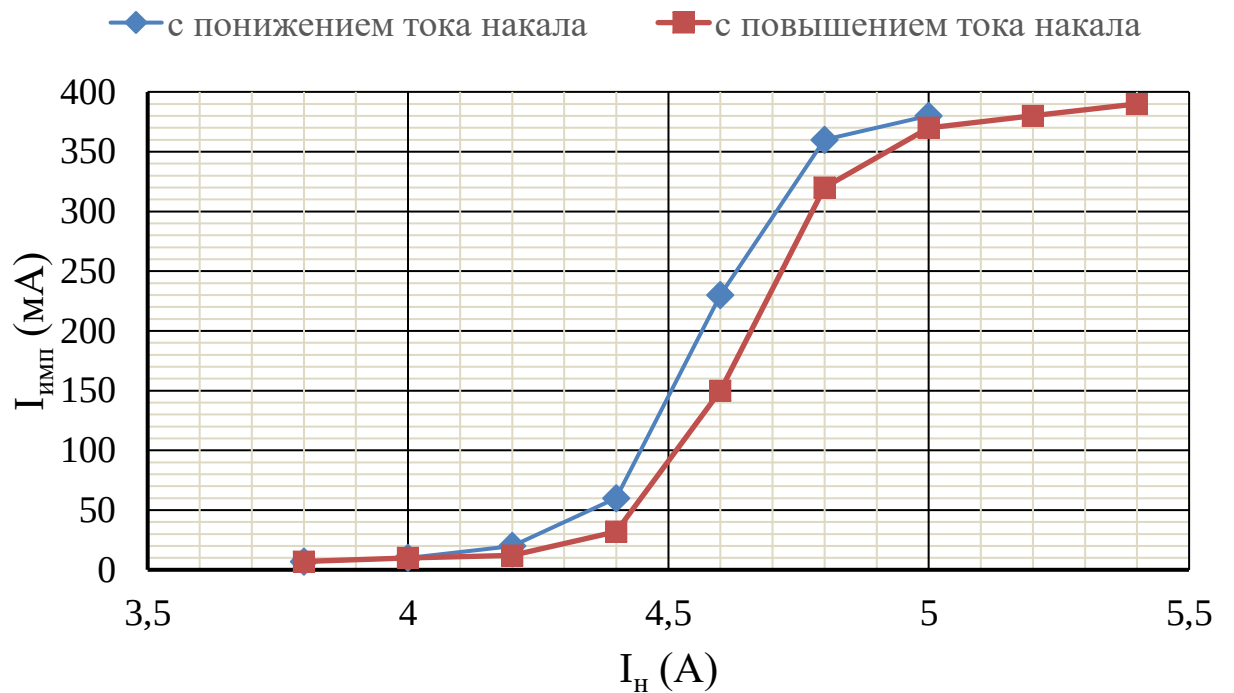


Рис. 4. Накальная характеристика пушки

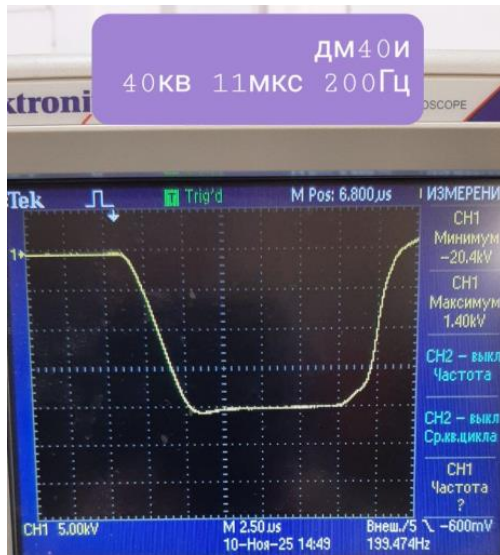


Рис. 5. Импульс напряжения на катоде.

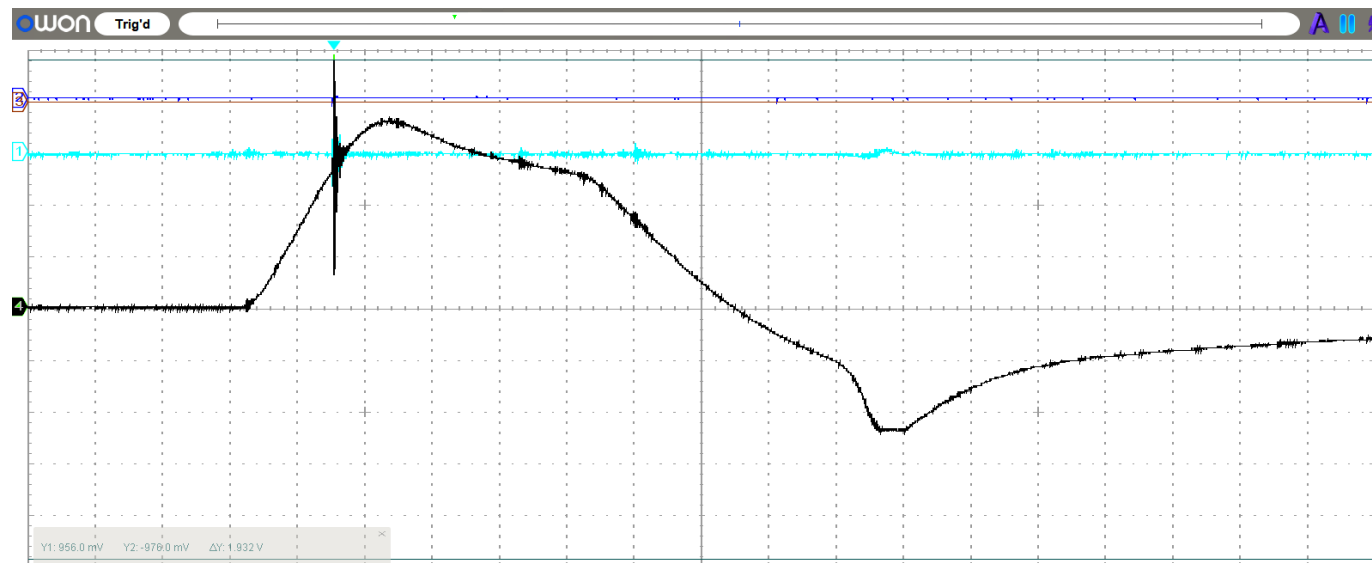


Рис. 6. Форма импульса тока пушки (100 мА/дел., 2 мкс/дел.).

Система питания СВЧ

Клистрон КИУ-284 — S-диапазон, 2856 МГц

Источник входного сигнала — тракты СВЧ низкого уровня мощности

Импульсный модулятор — питание клистрона

Волноводный тракт — передача мощности к секции, заполнен элегазом SF₆

Параметр	Значение
СВЧ-мощность в стенках (нерег.)	3.7 МВт
СВЧ-мощность в стенках (рег.)	3.8 МВт
Длительность СВЧ-имп.	2.5 мкс
Частота повторения	4–6 Гц
Оптим. фаза мод-ра	–105°



Рис. 7. Клистрон КИУ-284 и повышающий трансформатор.

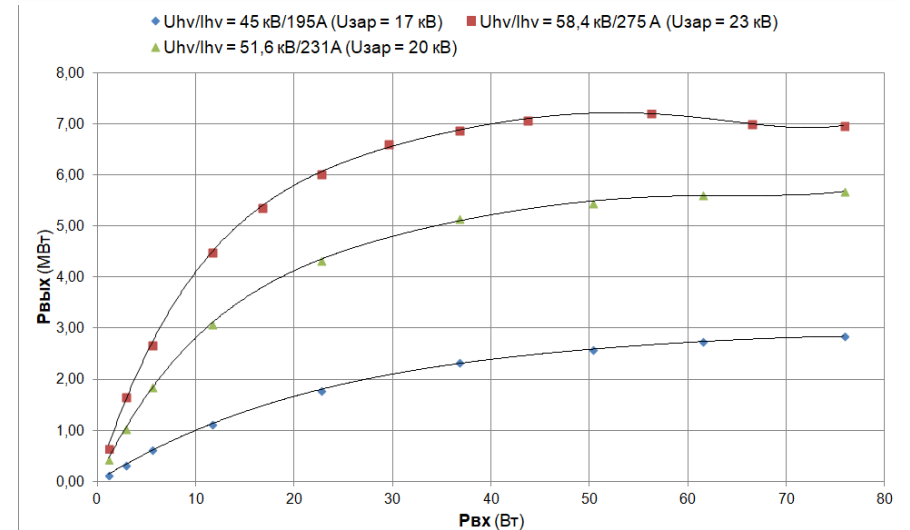


Рис. 8. Выходная характеристика КИУ-284.

Система питания СВЧ

Контроллер на основе LPC1768 — разработан автором (платы измерительная, синхронизации)

Протокол ModBus TCP/IP — для передачи данных

Приложение GUI_RF_Measurements — MATLAB Runtime, автоматическая калибровка

Экспорт в Excel с макросами автопостроения графиков

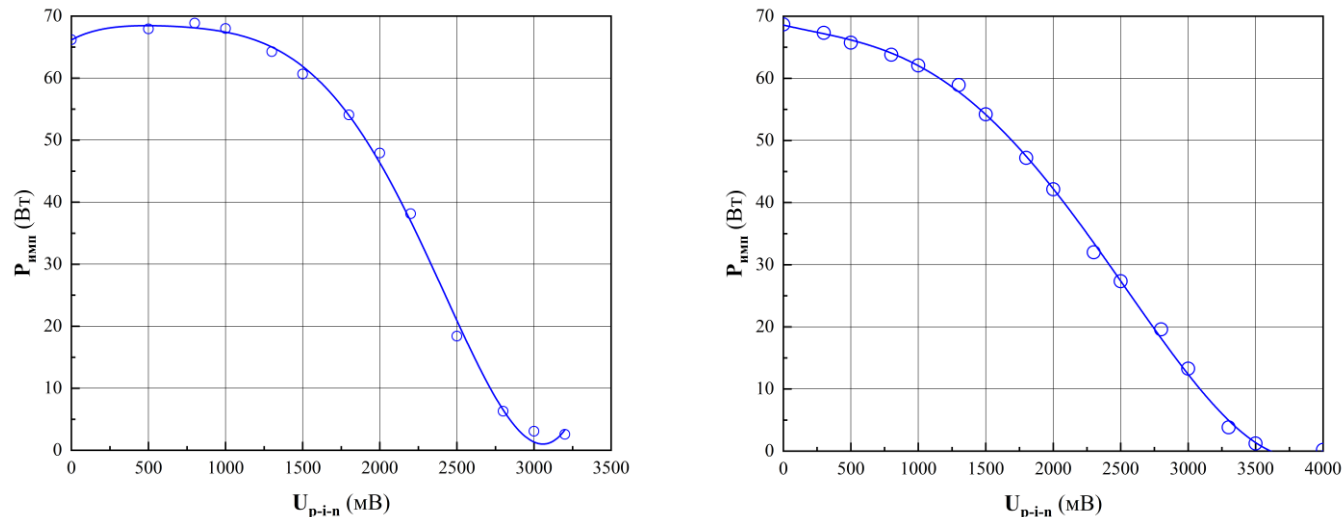


Рис. 9. Калибровочная кривая трактов низкого уровня мощности первой и второй секций.

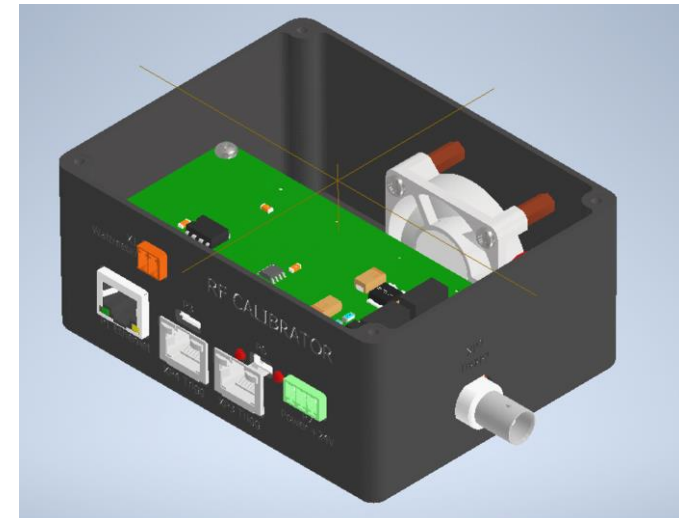
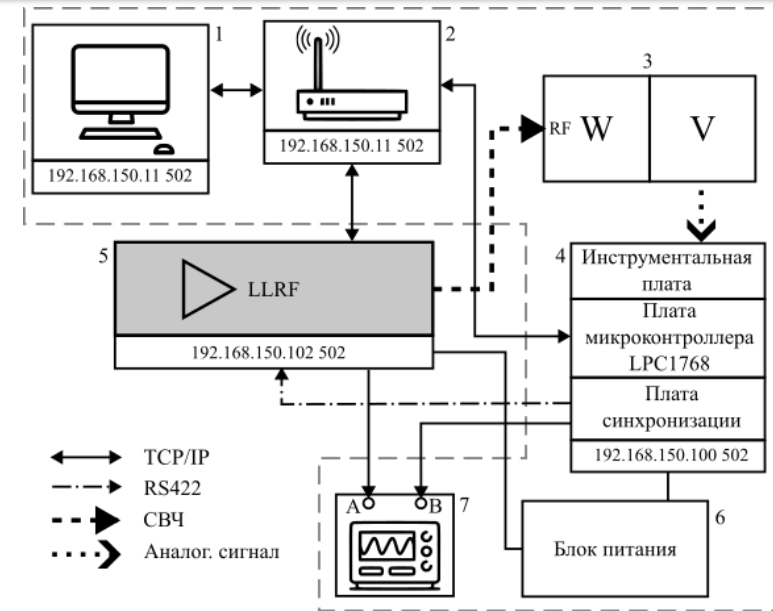


Рис. 10. Схема стенда калибровки тракта СВЧ низкого уровня мощности и его контроллер.

Калибровка СВЧ-тракта и методика измерений

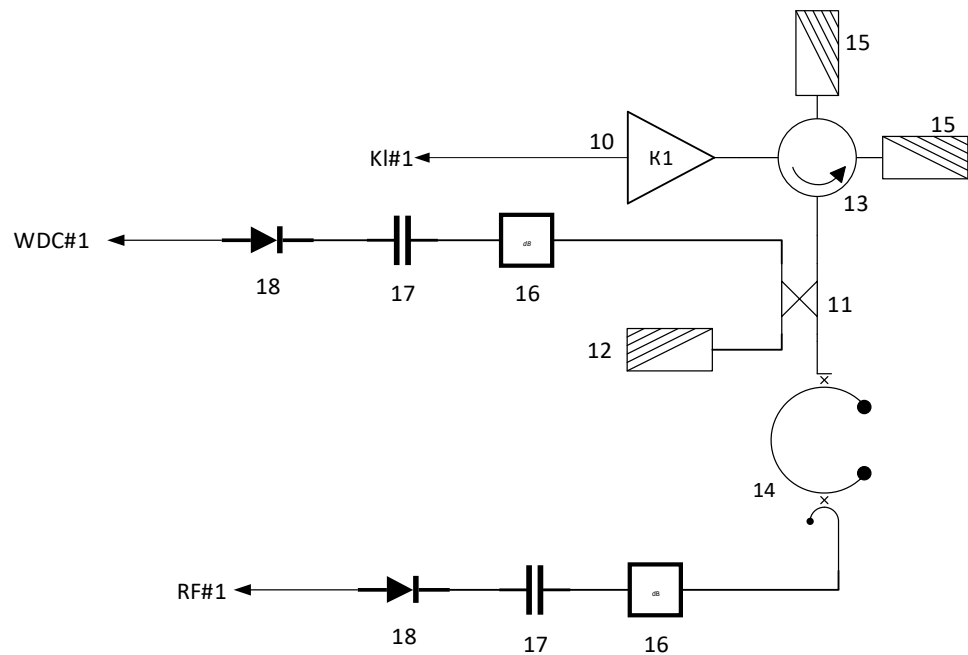


Рис. 11. Схема измерений импульсной мощности СВЧ в волноводном тракте стенда линейного ускорителя: 10 – клистрон, 11 – направленный ответвитель, 12, 15 – согласованная нагрузка, 13 – циркулятор, 14 – ускоряющая структура, 16 – фиксированный аттенуатор, 17 – СВЧ гальваническая развязка, 18 – детекторная головка SHX-803-S-8-SMA(M,F).

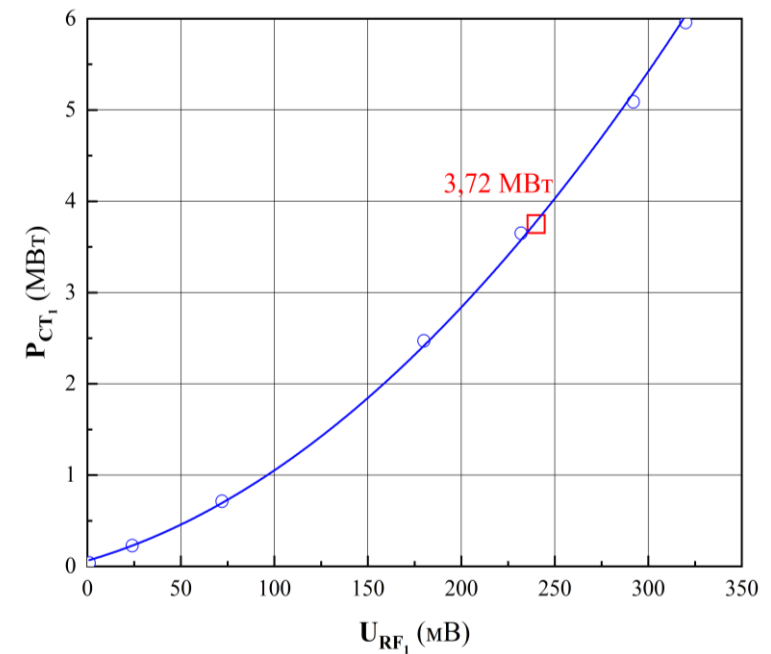


Рис. 12. Зависимость импульсной мощности СВЧ в нерегулярной (а) и регулярной секциях (б) от амплитуды огибающей на выходе детекторного диода

Система питания СВЧ

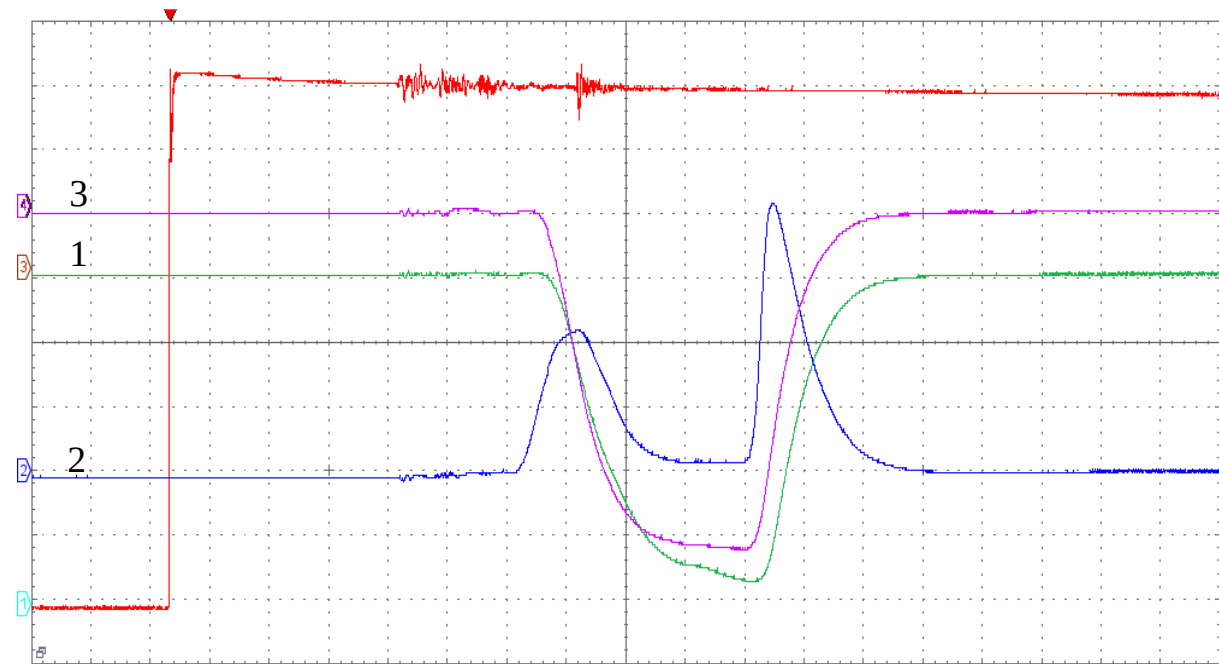
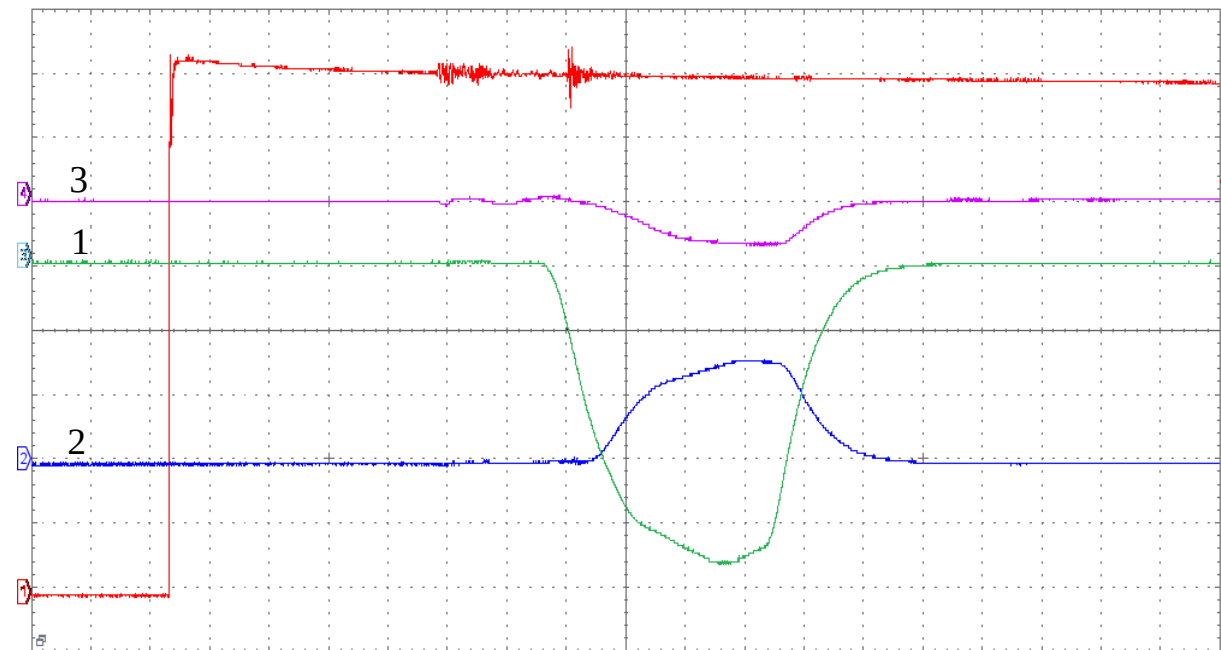


Рис. 13-14. Импульсы огибающей СВЧ: 1 – с петли связи нерегулярной структуры (3.7 МВт), 2 – отраженной волны тракта регулярной структуры (0.1 МВт), 3 – с петли связи регулярной структуры (4.1 МВт). (50 мВ/дел., 1 мкс/дел.)

Термостабилизация ускоряющей структуры

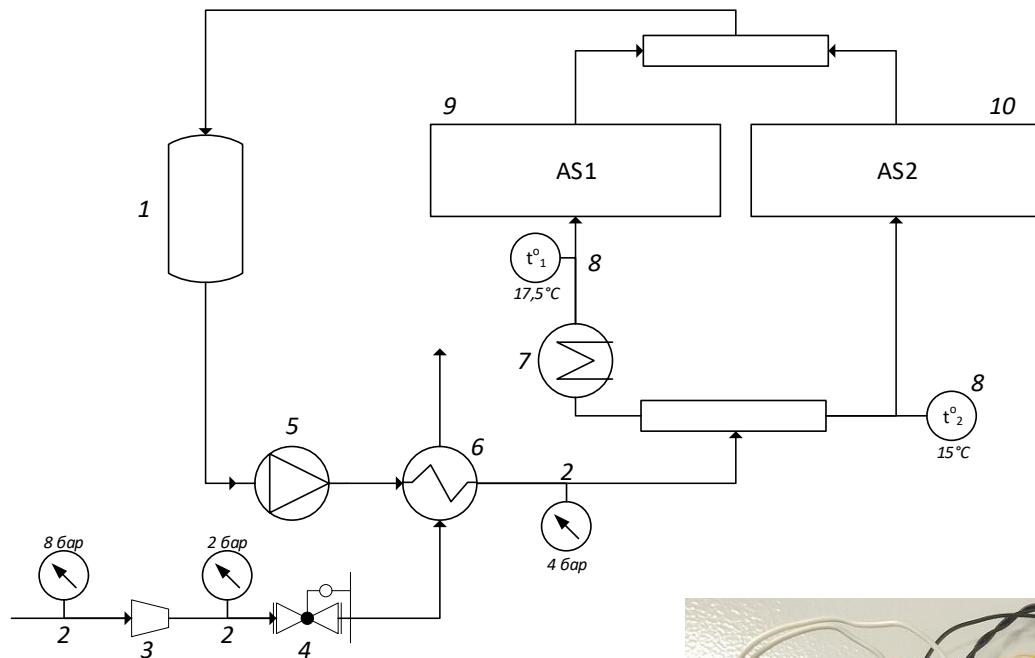


Рис. 15. Схема системы термостабилизации

PID-регулятор DTC1000L

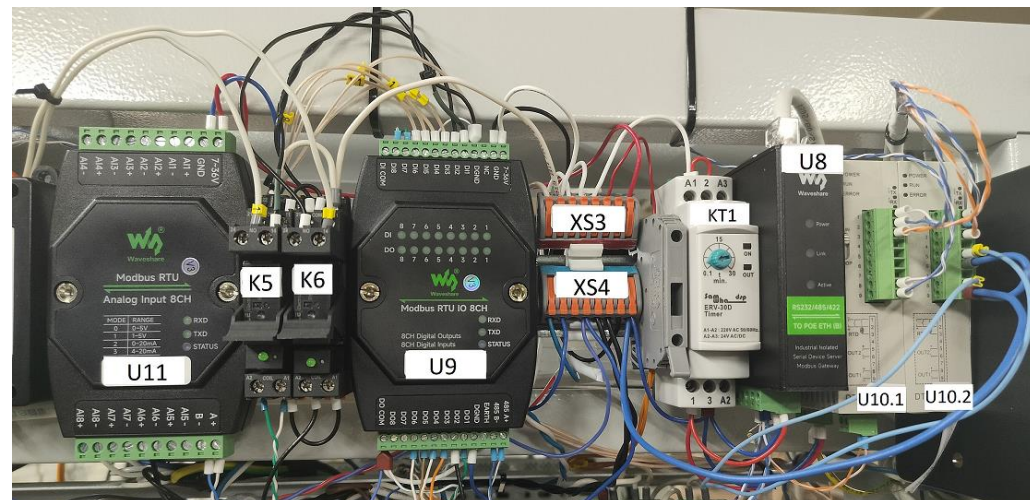
Датчики Pt100 — трёхпроводная схема

ТЭНы с тиристорным регулятором

Клапан ESPA 02 — моторизованный редукционный

Точность поддержания: $\pm 0.1^\circ\text{C}$

$$\Delta t = (2.5 \pm 0.1)^\circ\text{C} \quad | \quad t_1 = 17.5^\circ\text{C} \quad | \quad t_2 = 15.0^\circ\text{C}$$



Энергетические спектры

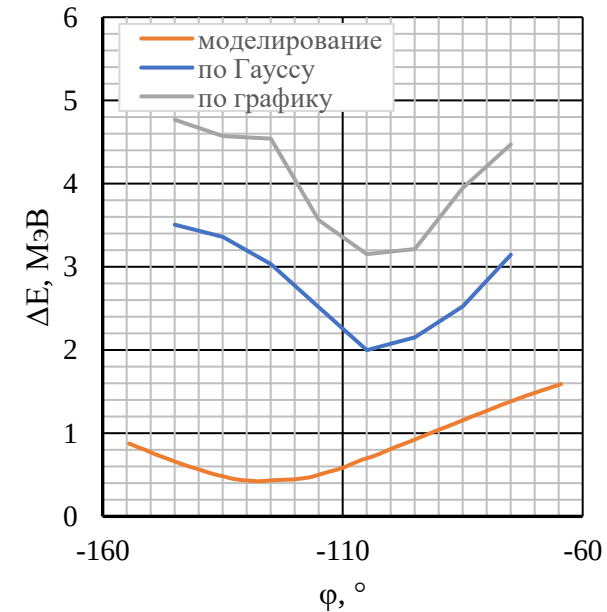
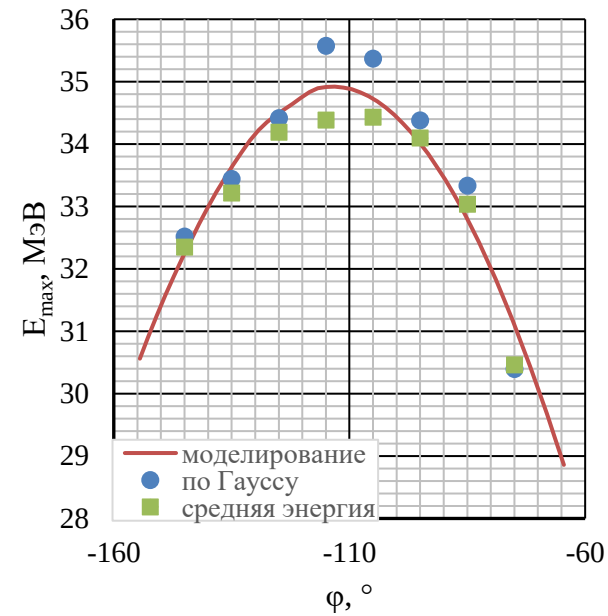
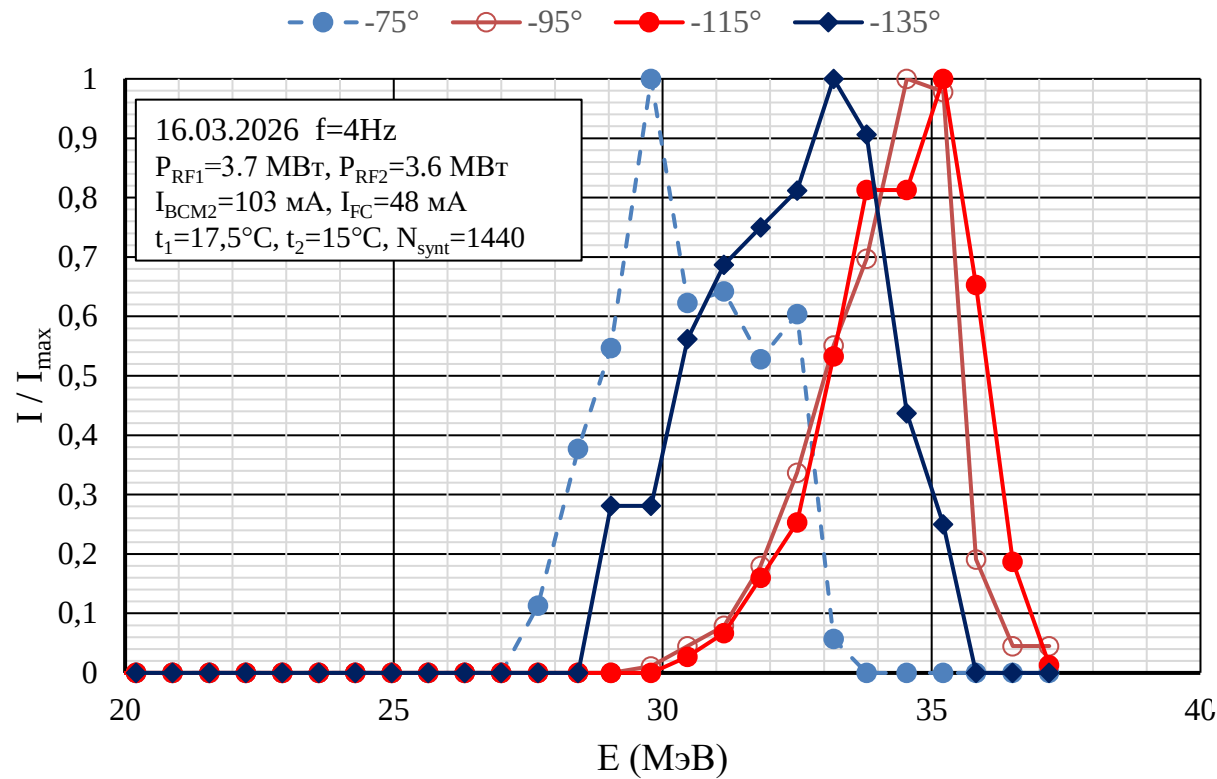


Рис. 16. Спектры зарегистрированы в диапазоне фаз модулятора от -145° до -75° при токе пушки 150 мА. Максимальная энергия (35 МэВ) при оптим. фазе -105° . Отклонение фазы ведёт к уширению спектра и сдвигу энергии.

Основные результаты

Параметр	Значение
Энергия пучка	10–35 МэВ
Ток пучка	100 мА
Длительность импульса	2.5 мкс
Частота повторения	4–6 Гц
Мощность СВЧ в стенках (нерег.)	(3.7±0.1) МВт
Мощность СВЧ в стенках (рег.)	(3.6±0.1) МВт
Ширина спектра $\Delta E/E_{\max}$	≥ 6 %
Оптимальная фаза I/Q-модулятора	–105°
Стабильность Δt	(2.5±0.1)°C

Спектры с подробными параметрами позволяют воспроизводимо генерировать электроны с требуемой энергией

Заключение

Катод пушки активирован, источник стабильно работает (-40 кВ)

СВЧ-система настроена, мощность $3.7 / 3.6$ МВт в стенках секций, точность ± 0.1 МВт

Система термостабилизации точность ± 0.1 °C, $\Delta t = (2.5 \pm 0.1)$ °C

Отработана методика пуска, спектры $10\text{--}35$ МэВ точность ± 0.5 МэВ, $\Delta E/E_{\max} \geq 6\%$

ПРАКТИЧЕСКАЯ ЗНАЧИМОСТЬ

- Стенд готов к фундаментальным исследованиям
- Методика настройки применима к другим ускорителям

ПЕРСПЕКТИВЫ

- Исследование фотоядерных реакций методом наведённой активности
 - Повышение энергии до 40 МэВ
 - Увеличение частоты повторения
 - Автоматизация полного цикла настройки

Спасибо за внимание!

Спасибо за внимание!

Запасной: Диагностика пучка и физический пуск

ВСМ — датчик тока пучка — бесконтактный, калибровка по току

Магнитный спектрометр — отклоняющий дипольный магнит 45°

Программа на LabVIEW — автоматизация измерения спектров

Оптимизация фазы СВЧ — минимизация отражённой волны

