

**Линейный  
Ускоритель  
Электронов  
200** - максимальная проектная  
энергия пучка

- генератор фотонейтронов

**Источника  
Резонансных  
Нейтронов**

А.П. Сумбаев

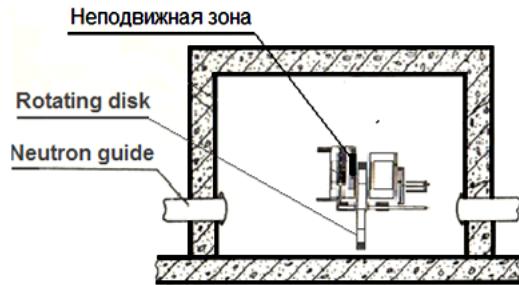
*Лаборатория физики высоких энергий  
ОИЯИ, Дубна, Россия*

# Содержание

- Историческая необходимость создания ускорителя
- Проектные параметры ускорителя
- Состав и устройство ускорителя
- Создание и физпуск первой очереди ускорителя
- Создание и физпуск второй очереди
- Энергетический пуск ускорителя, текущее состояние
- Заключение. Проблемы ЛУЭ-200 и его развитие

# Эволюция источников нейтронов ЛНФ

Зд. 43 ЛНФ

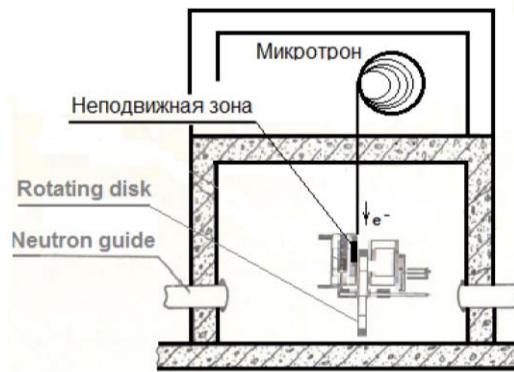


ИБР

Неподвижная зона (Pu-239 )  
+ диск с U-235 вкладышами

1960 - 1964

Зд. 43 ЛНФ

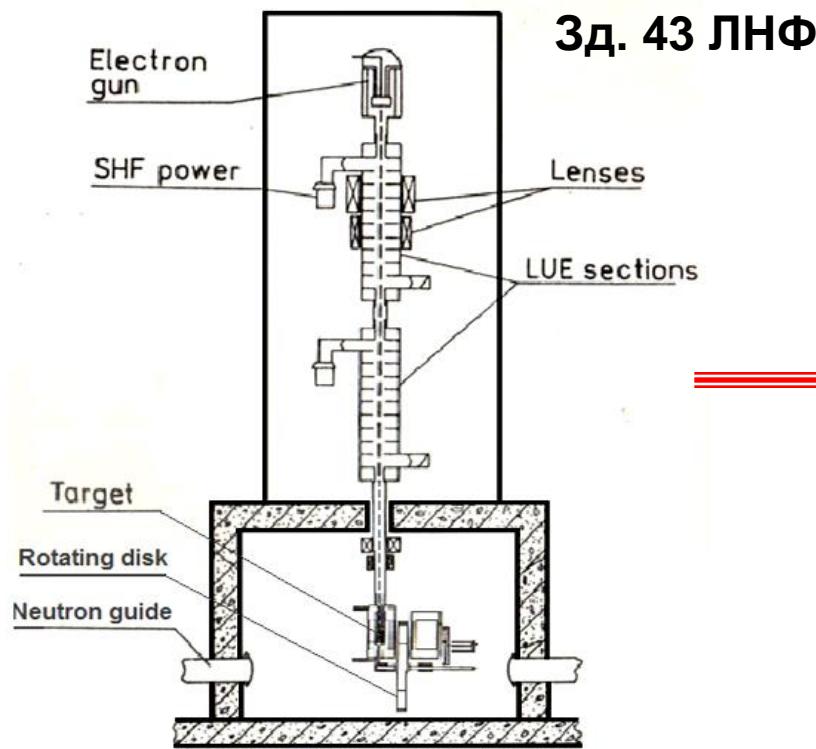


ИБР + микротрон

Неподвижная зона (Pu-239 )  
+ диск с U-235 вкладышами

1964-1968 (ИБР + микротрон)

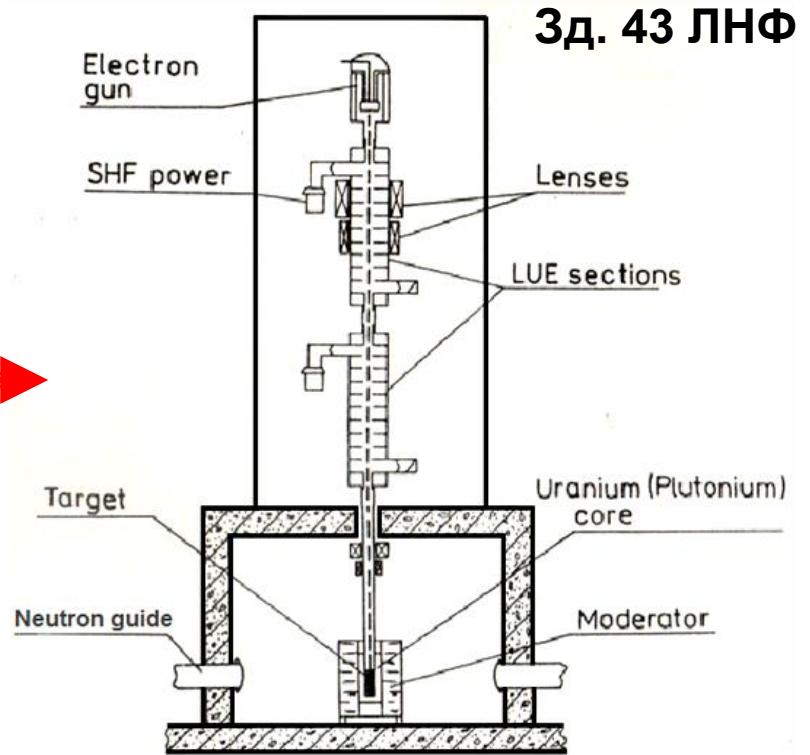
# Эволюция источников нейтронов ЛНФ



ИБР-30. Драйвер + бустер

Эл. линейник ЛУЭ-40  
+ неподвижная активная зона (Pu-239 )  
+ диск с U-235 вкладышами

1970 - 2001



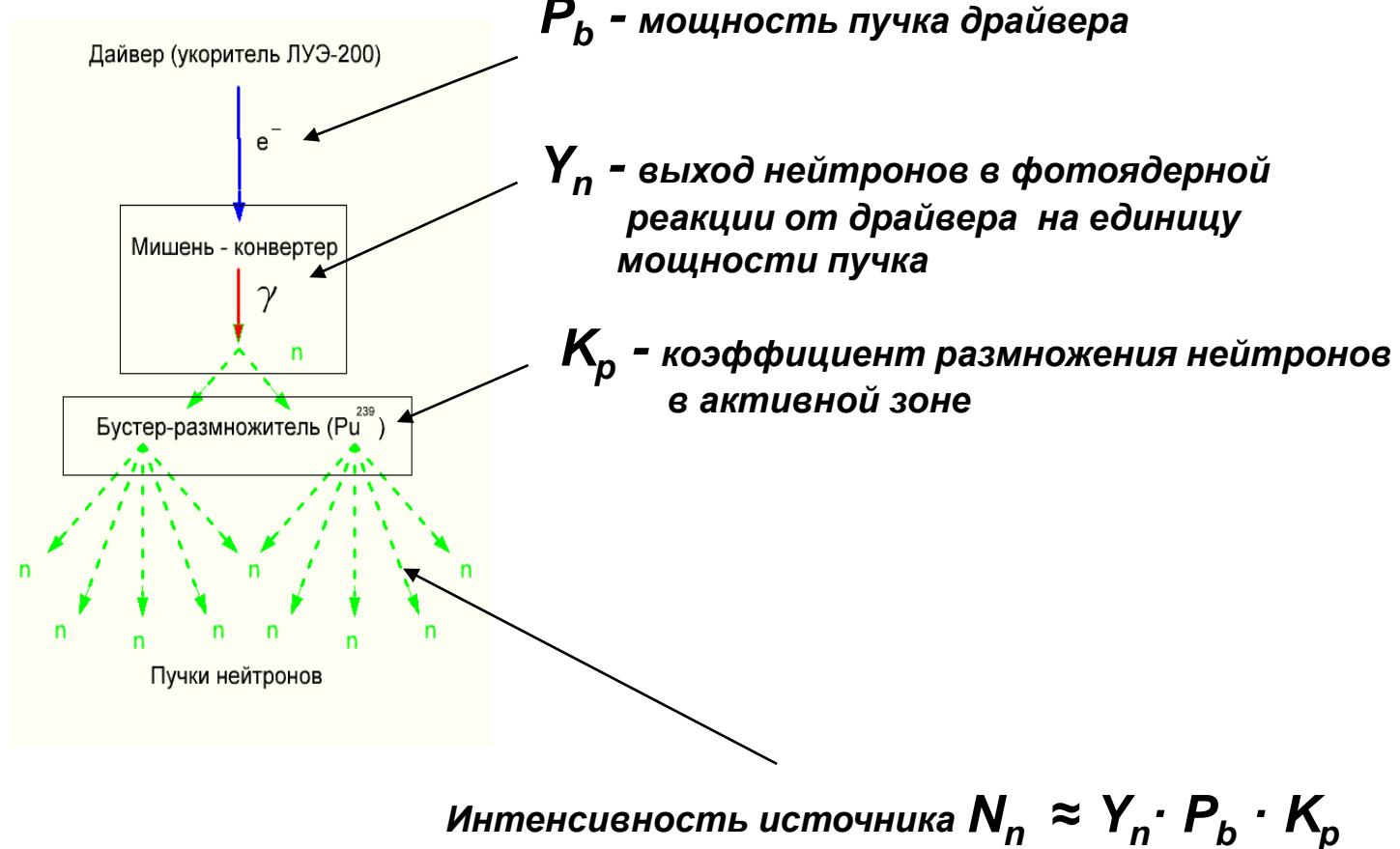
ИРЕН. Драйвер + бустер  
(проект)

Эл. линейник + активная зона (Pu-239 )  
Предложен в 1992г. Утвержден в 1994г.

# Характеристики импульсных источников нейтронов ЛНФ

	ИБР	ИБР + Микротрон	ИБР - 30 (ЛУЭ-40 + ИБР)	Проект ИРЕН (Линак + размножающая мишень)
	1960 -1964	1964 - 1968	1970	Предложение 1992г.
Длительность нейтронного импульса	50 мкс	3 - 4 мкс	3 - 4 мкс	0.4 мкс = (0.2 + 0.2) мкс
Частота циклов			100 Гц	150 Гц
Коэффиц. размножения нейтронов в активной зоне	400	~ 200	~ 200	~ 30
Средняя интенсивность (в 4π пространство)			$5 \times 10^{14}$ н/сек	$(5 - 9) \times 10^{14}$ н/сек

## Интенсивность источника нейтронов бустерного типа (проект ИРЕН 1992 г. с линейным ускорителем электронов)



*Параметры пучка (ускорителя) детерминированы параметрами нейтронных пучков проектируемого источника:*

### **Мощность пучка $P_b$**

из  $N_n \approx Y_n \cdot P_b = (1.7 - 3.0) \cdot 10^{13}$  н/сек можно оценить  $P_b = N_n / Y_n$

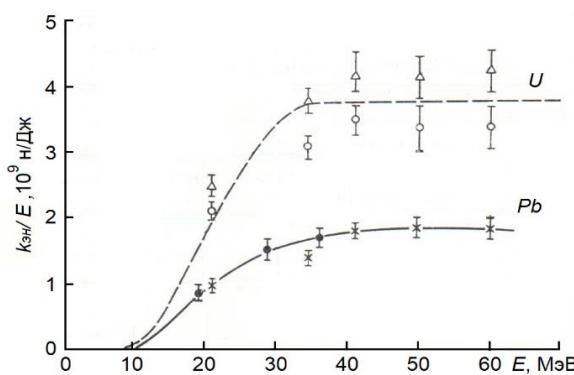
где  $Y_n \approx 4 \cdot 10^{15}$  н/(сек·МВт) для U

$Y_n \approx 1.9 \cdot 10^{15}$  н/(сек·МВт) для Pb

$Y_n \approx 2.3 \cdot 10^{15}$  н/(сек·МВт) для W

$$P_b \longrightarrow \sim 10 - 12 \text{ кВт}$$

**Энергия пучка  $E_b$  определяется характером зависимости выхода фотонейтронов из мишени от энергии**



*Выход нейтронов из мишени на единицу энергии электронного пучка для толстых мишеней из урана и свинца*

$$E_b \geq 30 - 40 \text{ МэВ} \longrightarrow (100 \text{ МэВ} - 200 \text{ МэВ})$$

*Параметры пучка (ускорителя) детерминированы параметрами нейтронных пучков проектируемого источника:*

### **Длительность импульса тока пучка $\tau_b$**

Разрешающая способность TOF метода  $\Delta E/E = - 0.28 E^{1/2}(\text{эВ}) \Delta t (\text{мкс})/L(\text{м})$ ,

где  $\Delta t = t_n + t_3 + t_d$ .

Из общих соображений  $t_n = \tau_b$      $\tau_b, t_n \leq t_3$ ,

для резонансных нейтронов  $t_3 \sim 300$  нсек, поэтому

$$\tau_b \longrightarrow \leq 250 \text{ нсек}$$

### **Ток пучка**

определяется из необходимой мощности пучка  
и «несущей» способностью ускоряющих структур

$$I_b \longrightarrow \sim 1.5 - 2.0 \text{ А}$$

### **Частота циклов пучка**

обусловлена:

- временем пролёта канала (до 1000 м) резонансными нейтронами
- + техническими способностями мощных кlyстронов 10 см диапазона

$$f_b \longrightarrow \leq 150 \text{ Гц}$$

### **Длина ускорителя $L \leq 10\text{м}$ ,**

исходя из габаритов помещений существующего здания 43 ЛНФ

### **Темп ускорения**

$$E/L \geq 200 \text{ МэВ/10 м} \longrightarrow \geq 30 \text{ МэВ/м}$$

**На право участвовать в проекте претендовали  
следующие ускорительные центры :**

- **НИИЭФА (С-Петербург)**
- **МИФИ (Москва)**
- **ХФТИ (Харьков)**
- **ИЯФ СО РАН (Новосибирск)**

**Вариант ИЯФ СО РАН самый продвинутый  
(проработанный)**

**инновационные особенности**

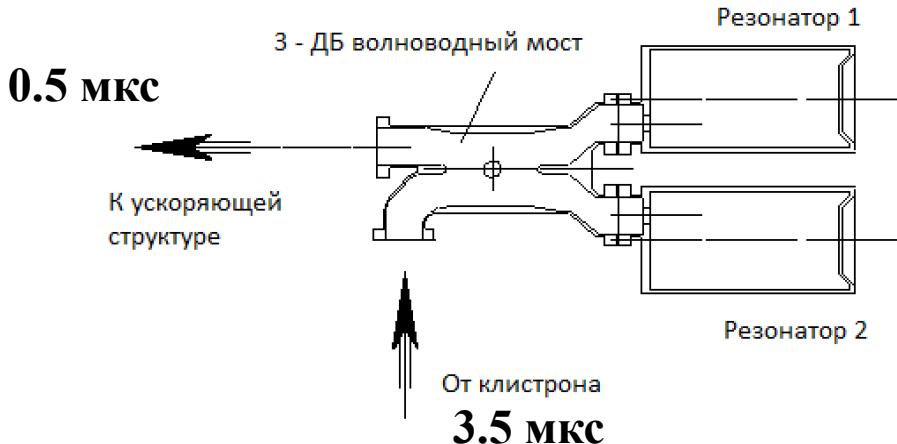
- *самые мощные клистроны на частоту 2856 МГц - «5045 SLAC»*
- *системы компрессии СВЧ мощности SLED*
- *самый высокий темп ускорения*

# Вариант ИЯФ СО РАН

**Клистрон 5045 SLAC  
63 – 67 МВт, 45 кВт**



**Система компрессии СВЧ мощности  
SLED**



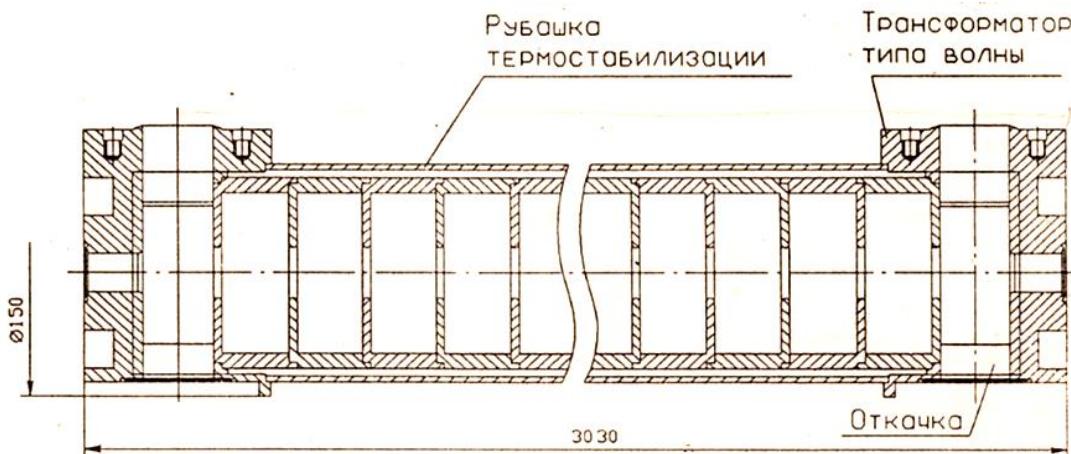
# Вариант ИЯФ СО РАН

## Параметры ускорителя :

Длина ускорителя  $L \leq 10$  м , исходя из габаритов помещений  
в существующем здании 43 ЛНФ

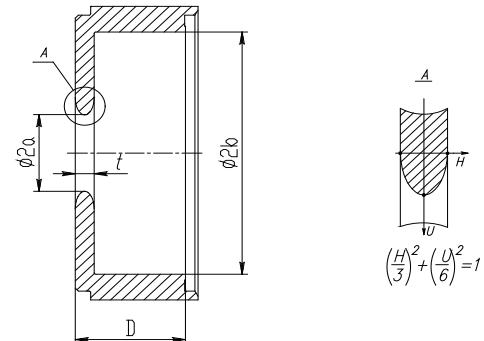
Темп ускорения  $E/L \geq 200$  МэВ/10 м  $\rightarrow E/L \geq 20$  МэВ/м

Ускоряющие структуры на бегущей волне 2856 МГц  
с постоянным импедансом



Длина ускоряющей секции 3 м

Проектный темп ускорения  $\geq 40$  МэВ/м



геометрия отдельной ячейки



внешний вид ячейки 17

# Параметры ускорителей ЛУЭ-40 и линака ИЯФ

Параметр	ЛУЭ-40	Линак ИЯФ (предложения)
Число ускоряющих секций	2	2
Длина ускоряющих секций	5 м	3 м
Рабочая частота СВЧ, МГц	2797	2856
Клистроны - источники СВЧ - мощности	КИУ-12 2 шт.	5045 SLAC 2 шт.
Максимальная выходная импульсная мощность клистрона, МВт	10	67
Системы компрессии СВЧ мощности	-	SLED
Проектный ускоряющий градиент секций	3 МэВ/м	35 МэВ/м
Длительность импульса тока пучка, нс	2000	250
Ток пучка, А	0.35	1.5
Частота циклов, Гц	100	150
Средняя мощность пучка, кВт	2.5	10
Максимальная энергия пучка электронов, МэВ	35	35 Мэв/м x 3м x 2 шт. ≈ 200 МэВ

## Разработка ИЯФ:

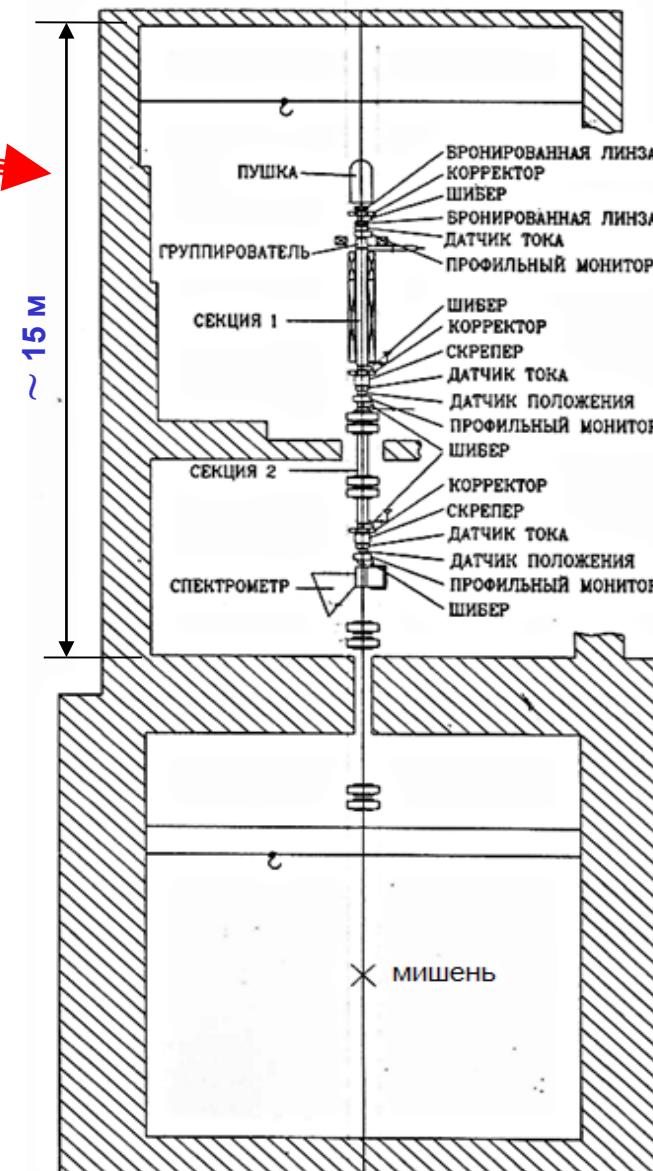
Концепция ускорителя

Ускоряющая система:

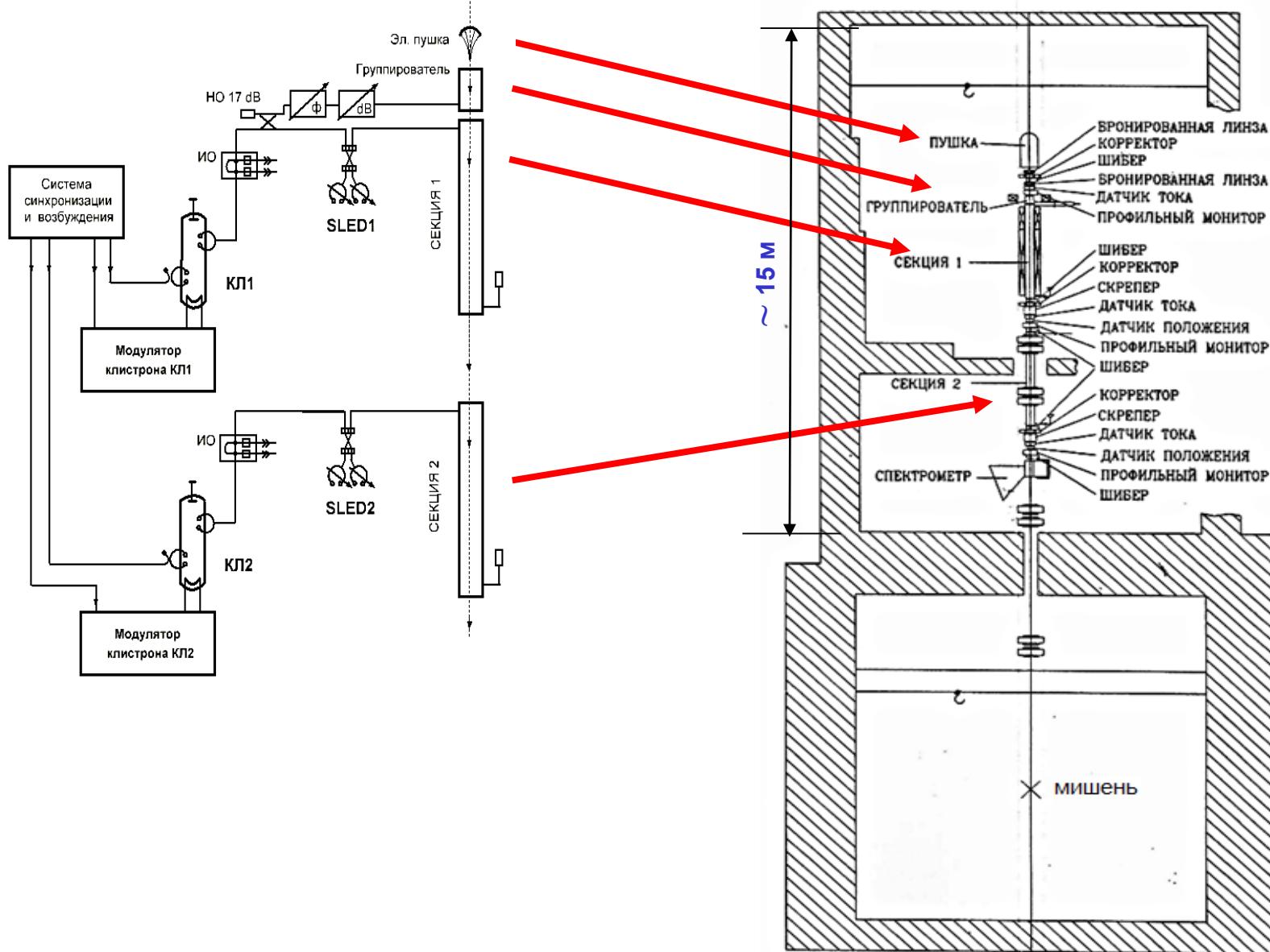
- + изготовление 2-х секций,  
группирователя, 2-x SLEDов)

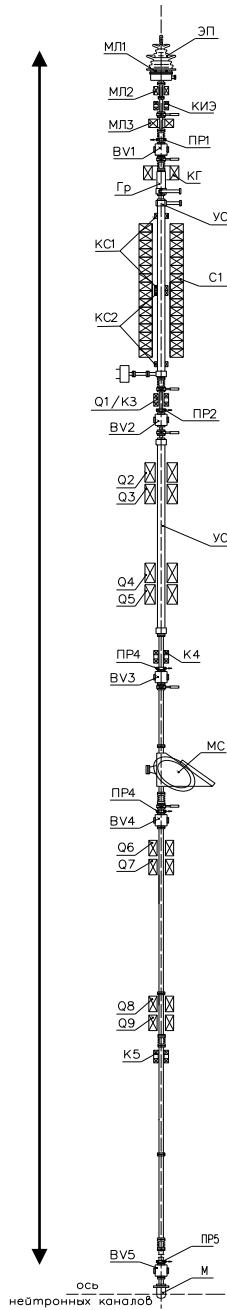
## Разработки ЛНФ + ЛФВЭ:

- Компоновка, несущие конструкции
- Источник электронов
- СВЧ система : две СВЧ станции  
(клистроны + модуляторы)  
+ система возбуждения
- Магнитная система
- Магнитный спектрометр
- Вакуумная система
- Система управления (синхронизации)
- Система диагностики пучка
- Система охлаждения +  
система терmostатирования



**Σ = Технический проект  
1994 год – старт проекта**





## Структура магнитной системы ускорителя ЛУЭ-200 технический проект

### Соленоидальный канал

Катушка группирователя

Соленоидальные катушки КГ, МЛ2, МЛ3 от пушки до 1-й УС

Соленоид вокруг 1-й секции (сплошной соленоид)

### Квадрупольный канал

Квадрупольные линзы на 2-й УС (Q2, Q3, Q4, Q5)

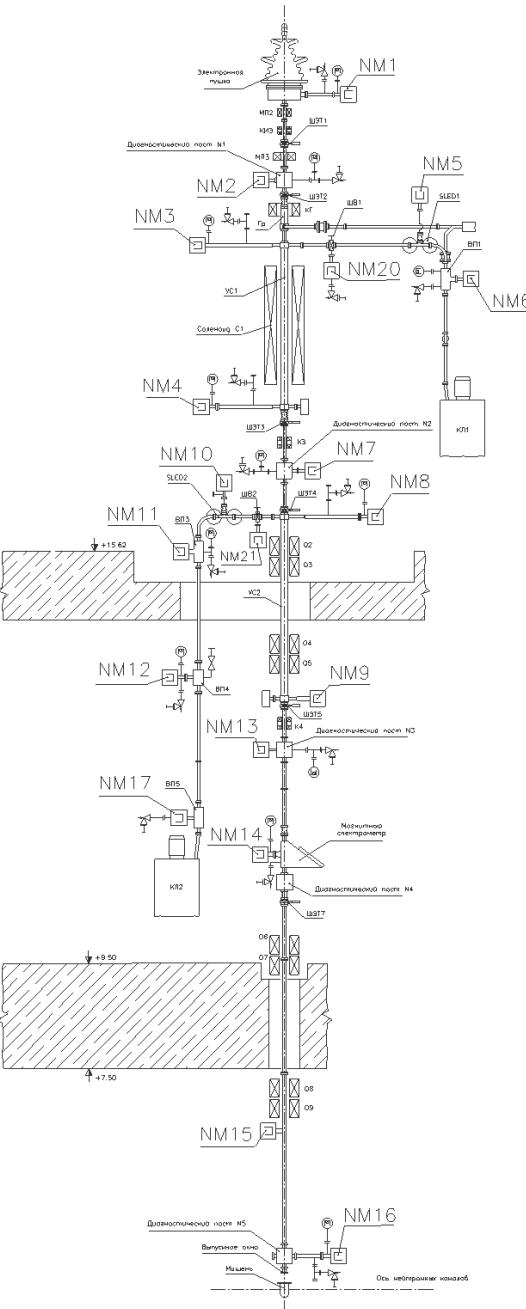
и в канале транспортировки (Q6, Q7, Q8, Q9)

### Магнитный спектрометр МС

### Магниты системы коррекции траектории пучка

корректоры КИЭ, КС1, КС2, К3, К4, К5

+ Система источников питания (28 источников)



## Структура вакуумной системы ускорителя:

Требуемая степень разрежения  $10^{-7}$  -  $10^{-8}$  Торр

### 7 автономных модулей

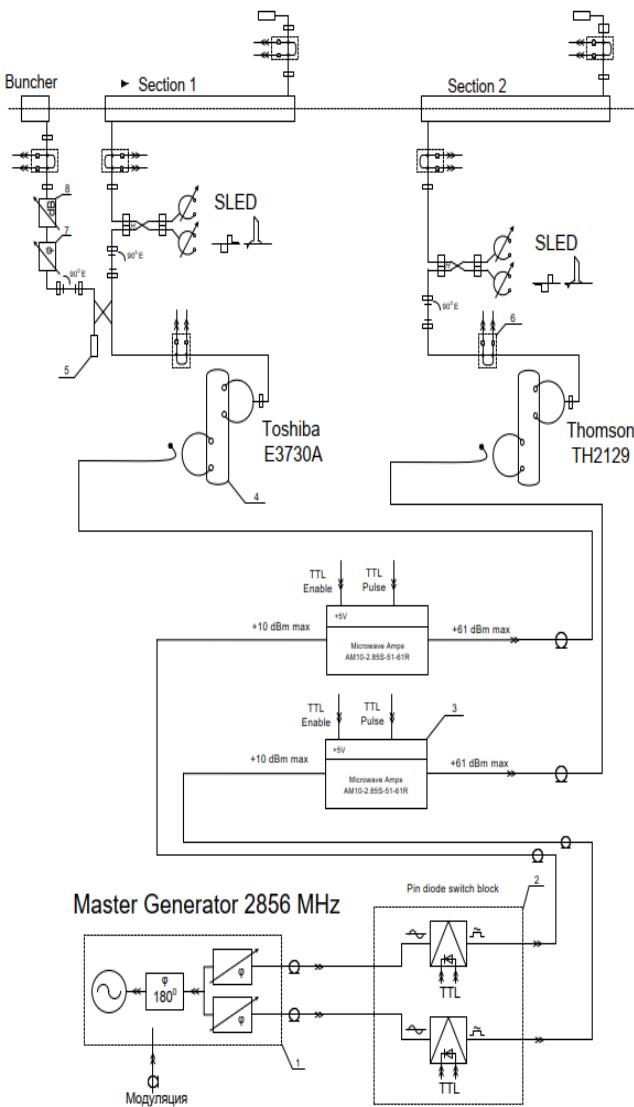
(эл. пушка, уск. секции, промежутки, магнитный спектрометр, канал транспортировки)

### 6 шиберов

22 вакуумных магниторазрядных агрегата

мобильные посты предварительной откачки

## Система СВЧ возбуждения клистронов



	5045 SLAC	E3730A Toshiba	TH2129 Thomson
Мощность СВЧ дозбуждения	300 Вт	500 Вт	100 Вт

**Два канала возбуждения  
с регулировкой фазы и  
СВЧ мощности в каналах до 1000 Вт**

**Возможность переворота фазы в каналах  
на 180 градусов с регулировкой  
момента включения для обеспечения  
работы системы SLED**

# ЛУЭ-200 I-я очередь

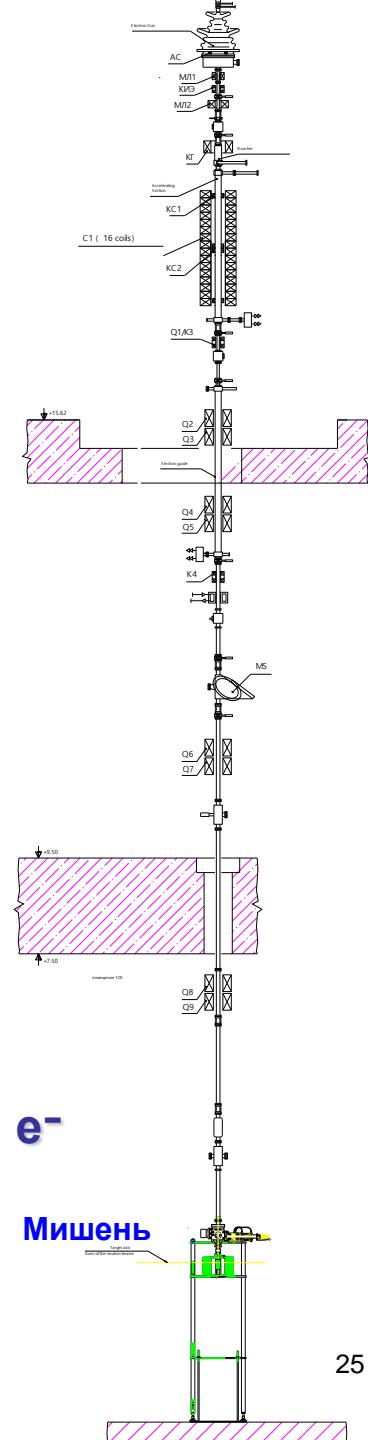
## **2000 - 2005г. Проектирование ЛУЭ в объёме I-й очереди :**

## **2003г. Начало монтажа оборудования ускорителя в объёме I-й очереди: (приказ по ОИЯИ)**

## **Особенности 1-ой очереди:**

- электронная пушка диодная, термакотод, 200кВ, те
  - одна секция, вместо второй секции - труба дрейфа,
  - один клистрон 5045 SLAC,
  - один модулятор – Оливин М250 (М350),
  - неразмножающая W мишень – конвертер; МРП (2005г.)

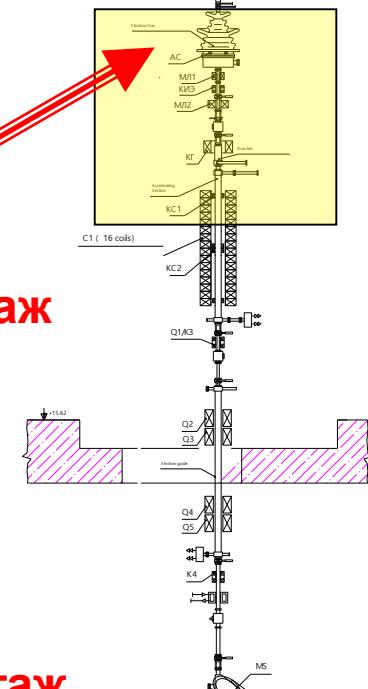
**2008г. вместо клистрона 5045 SLAC (63 МВт)  
установлен клистрон TH2129 Thomson (20 МВт)**



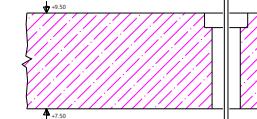


Электронная пушка

3-й этаж



2-й этаж

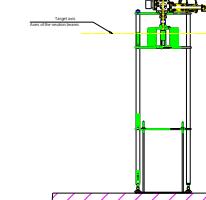


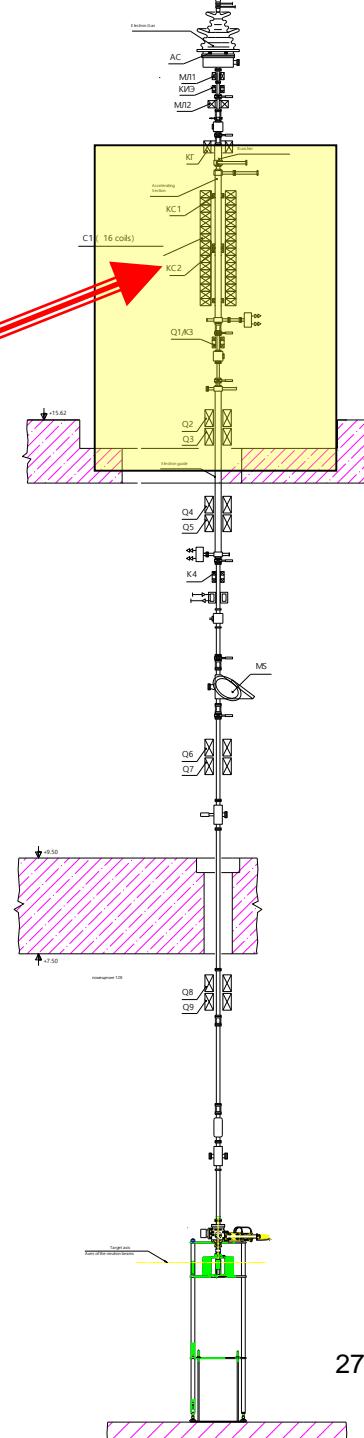
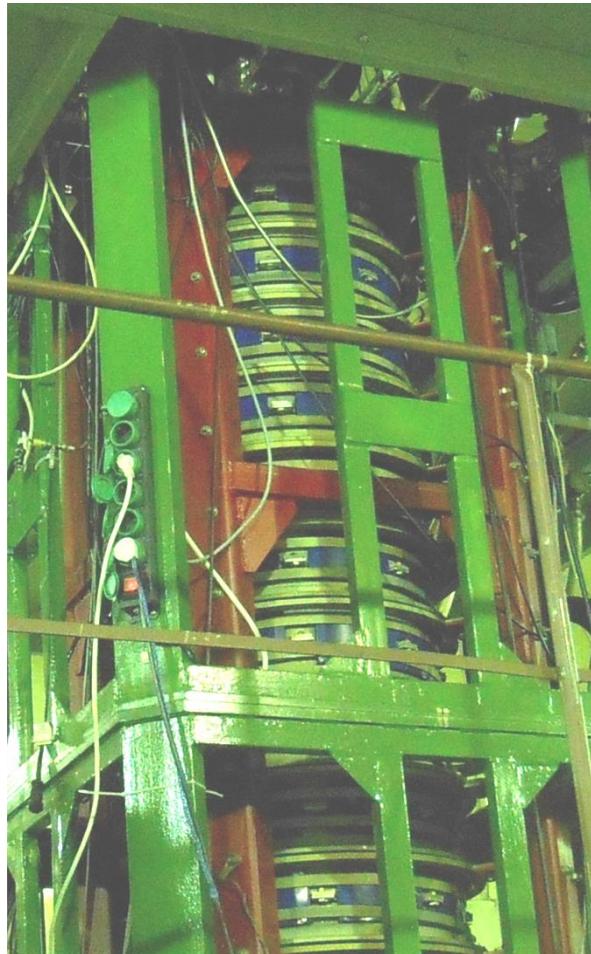
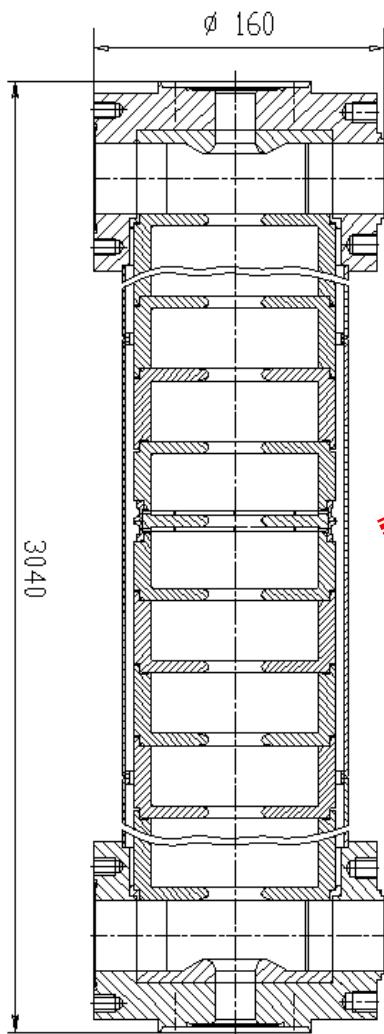
**2-х электродная пушка:**

**оксидный термокатод от лампы ГС-34,**

**$U_k = 200$  кВ, 100 – 250 нсек**

1-й этаж



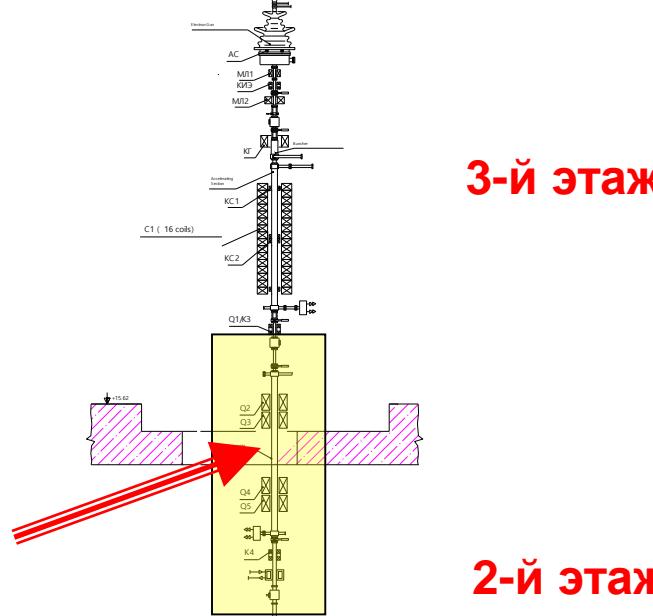


## Фокусирующий соленоид

$B_z = 3.2 \text{ кГс}, \pm 0.5\% \text{ на оси}$

Ускоряющая секция (ИЯФ) 2856 МГц

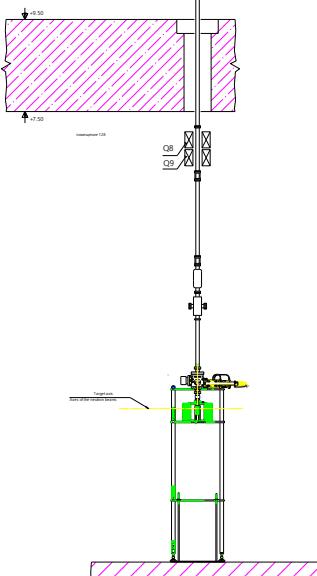
**Труба дрейфа вместо 2-й ускоряющей секции**

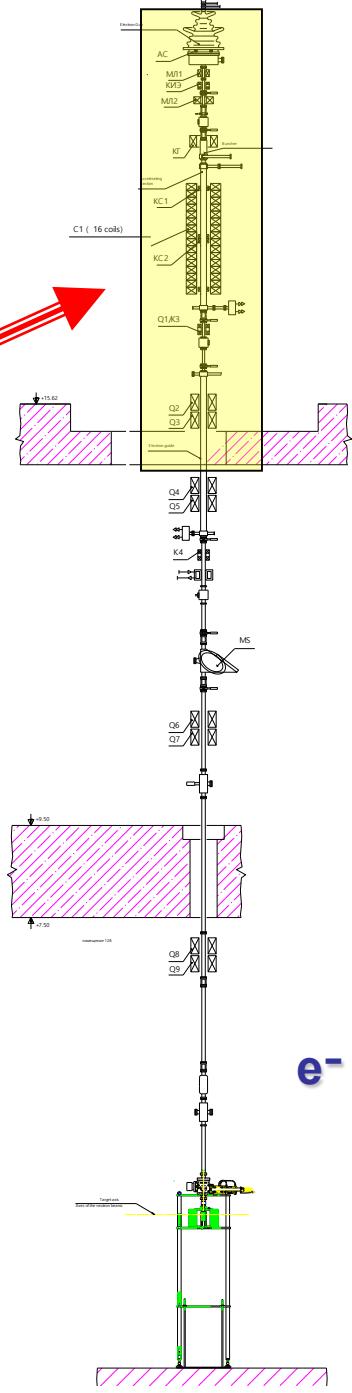
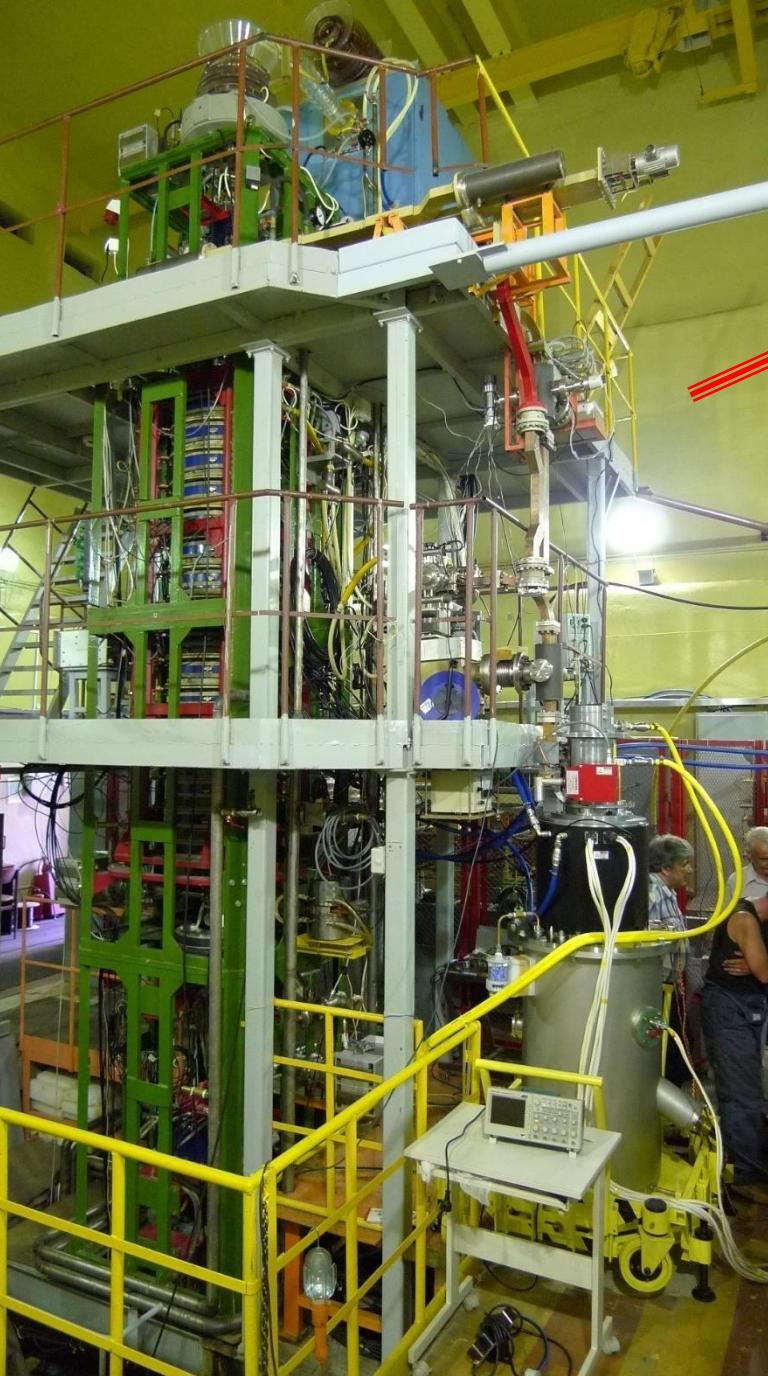


**Магнитная система  
(ЛВЭ,ЛНФ):**

- соленоидальный канал,
- жёсткофокусирующий канал

**1-й этаж  
мишеньный зал**





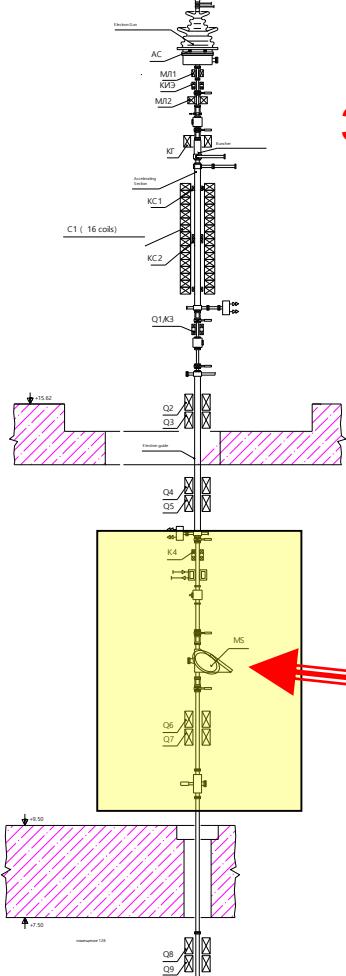
Верхняя часть ускорителя  
3-й этаж

2-й этаж

1-й этаж  
мишениный зал

**Средняя часть ускорителя**

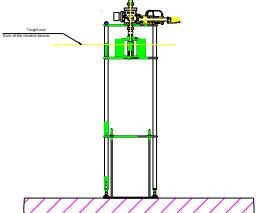
**2-й этаж**



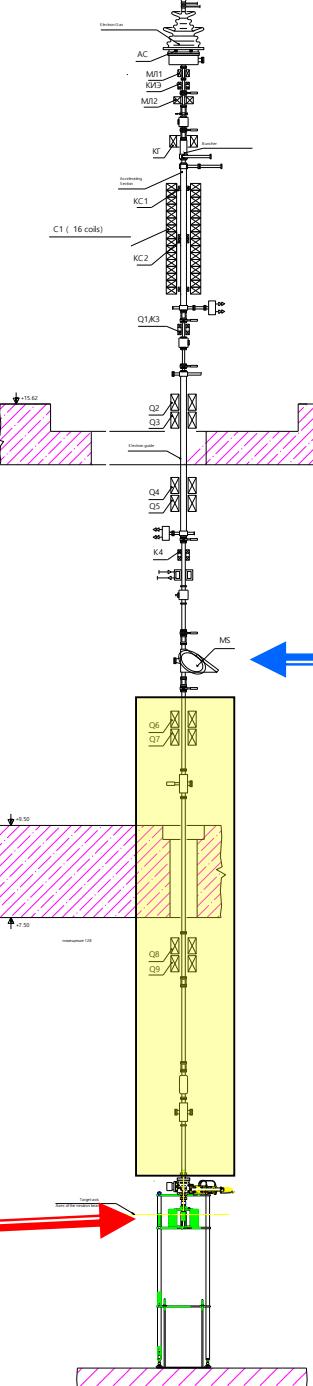
**3-й этаж**



**1-й этаж  
мишленный зал**



**Магнитный спектрометр**



Канал транспортировки  
пучка от спектрометра  
до мишени (ЛВЭ, ЛНФ)

3-й этаж

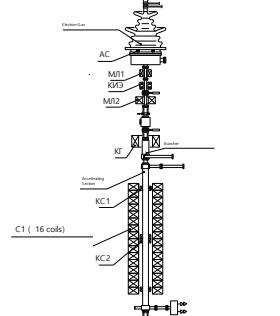
2-й этаж

Спектрометр

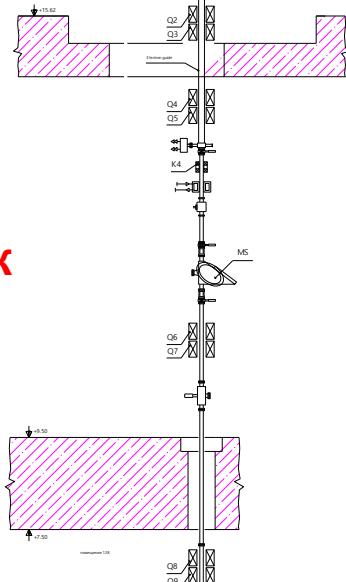
1-й этаж  
мишений зал

Неразмножающая  
W – мишень (ЛНФ)

**3-й этаж**

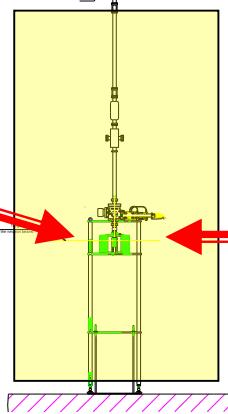


**2-й этаж**

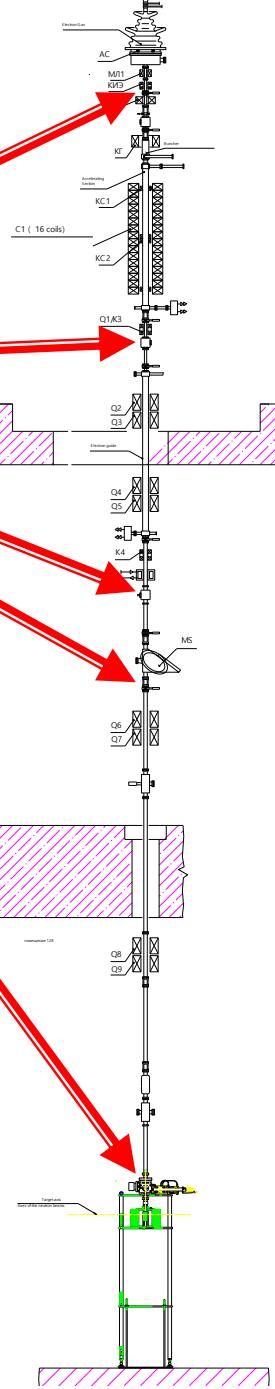
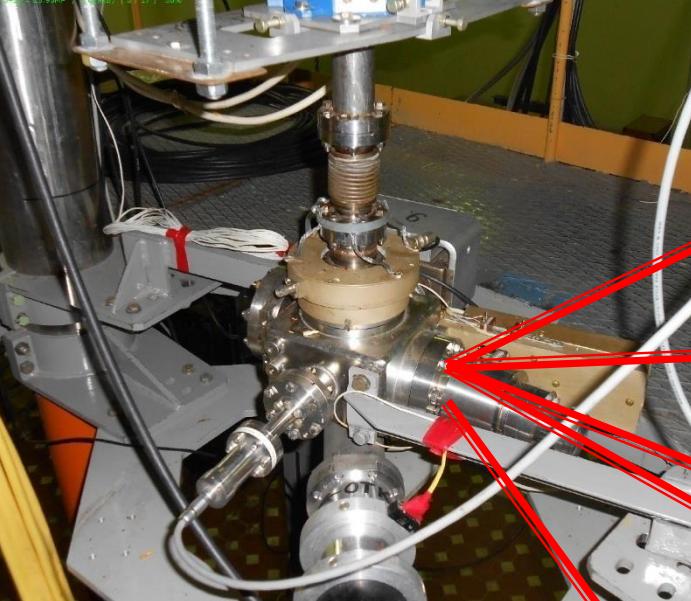


**Мишленный  
зал**

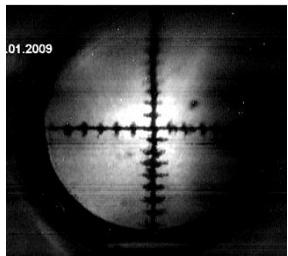
**1-й этаж**

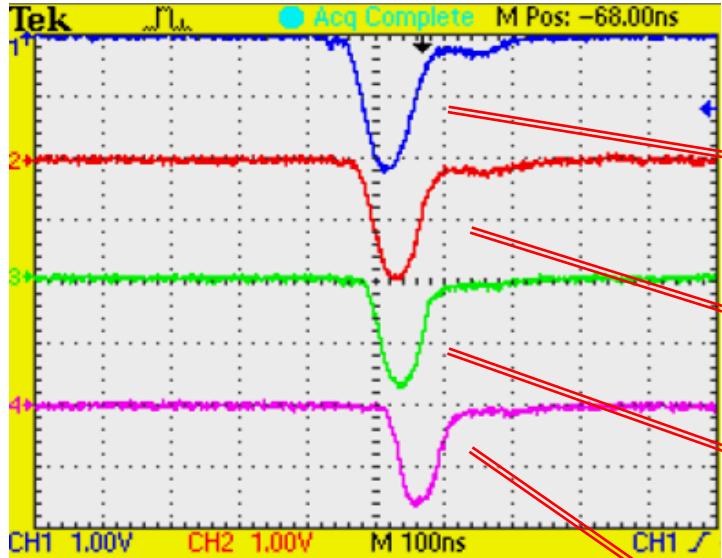


**W – мишень – конвертор**



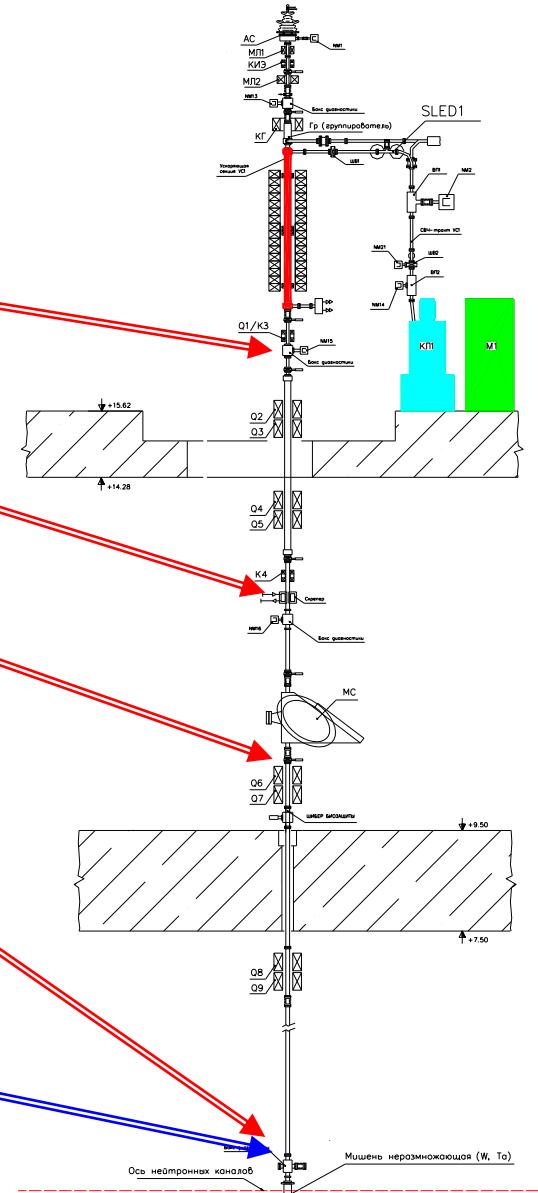
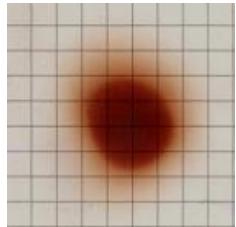
## Бимвьюеры





# *Ток пучка по тракту*

## **Пятно пучка на мишени (5 мм/дел.)**



# ЛУЭ-200 I-я очередь

2005г. Завершение проектирования  
в объёме I-й очереди (ЛНФ)

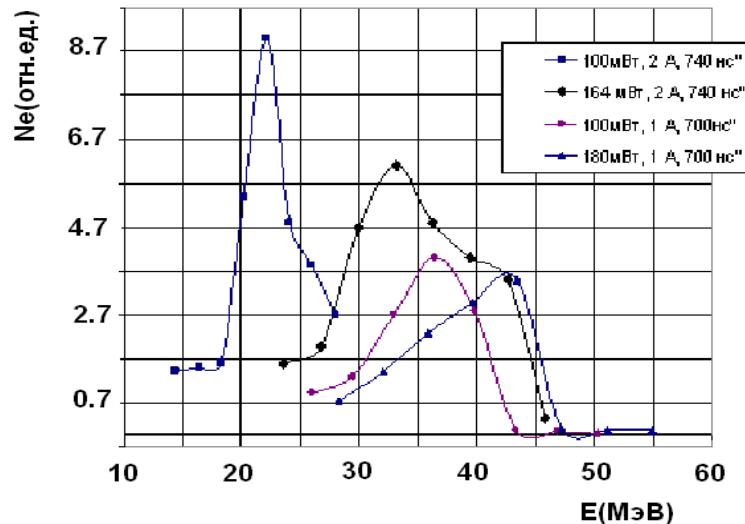
2003г. Приказ по ОИЯИ о начале монтажа  
оборудования ускорителя в объёме  
I-й очереди

2008г. вместо клистрона 5045 SLAC (63 МВт)  
установлен клистрон TH2129 Thomson (20 МВт)

17.06.2008 - первый пучок (от пушки)

23.07.2008 - пучок проведен через первую секцию

клистрон - 2129 Thomson  
20 МВт



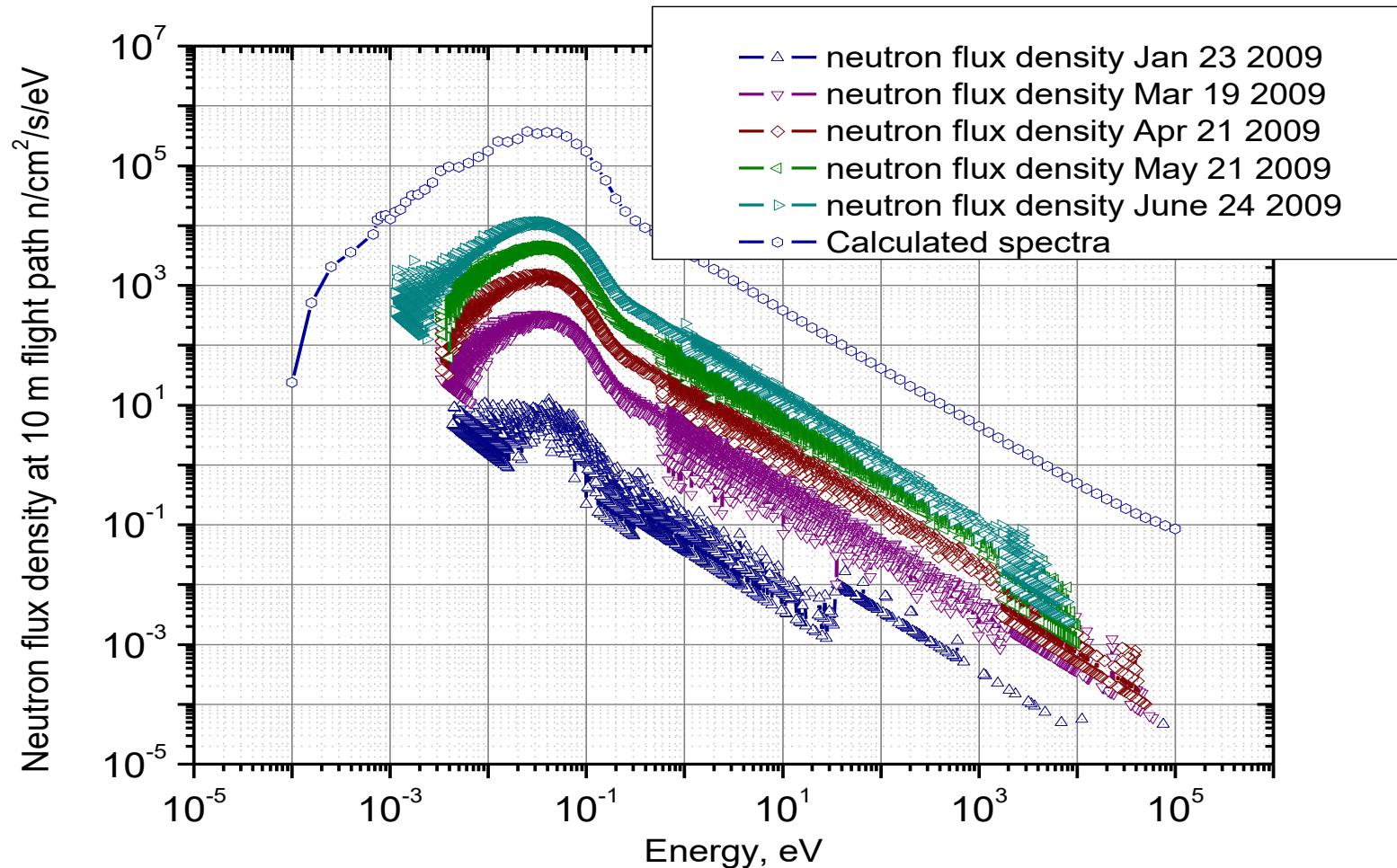
05.12.2008г. - зарегистрированы первые нейтроны

# Параметры ЛУЭ-200. I-я очередь

	Проект ИЯФ с коррекцией	I-я очередь ожидание	I-я очередь реализация
<b>Количество ускоряющих секций (количество клистронов)</b>	1 (1 клистрон)	1 (1 клистрон)	<b>1 (1 клистрон)</b>
<b>Тип клистрона, мощность клистрона</b>	5045 SLAC 67 МВт	2129 Thomson 20 МВт	<b>2129 Thomson 17 МВт</b>
<b>Энергия электронов</b>	106 МэВ	57 МэВ	<b>32 - 42 МэВ</b>
<b>Средний ток пучка в импульсе</b>	1.5 А	1.5 А	<b>1.5 - 2.0 А</b>
<b>Длительность токового импульса</b>	250 нс	100 нс	<b>100 нс</b>
<b>Частота циклов</b>	150 Гц	50 Гц	<b>25 Гц</b>
<b>Средняя мощность пучка</b>	≈ 5 - 6 кВт	0.43 кВт	<b>0.13 - 0.2 кВт</b>

# Спектры нейтронов установки ИРЕН

Experimental neutron spectra measured at 10 m flight path of IREN

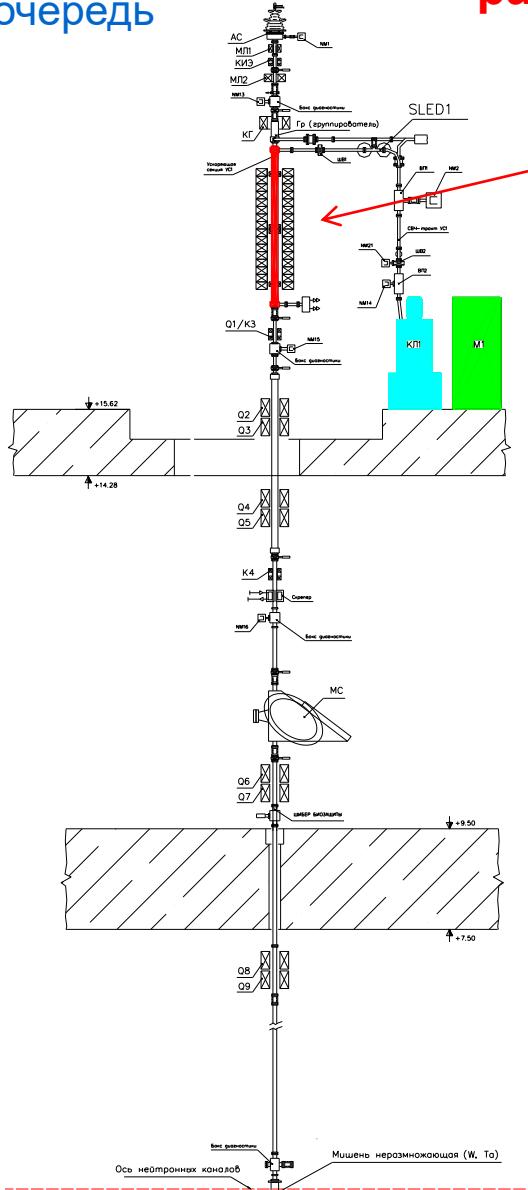


Первая очередь  $n \sim 10^{10} - 10^{11}$  сек-1

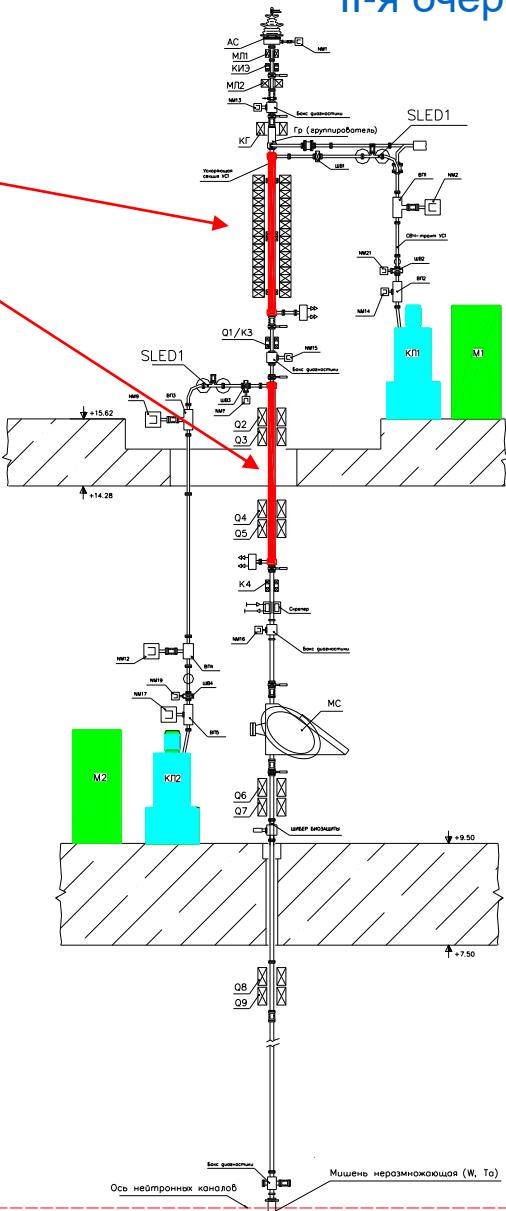
I-я очередь

развитие

II-я очередь



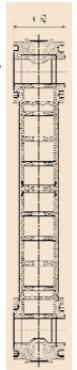
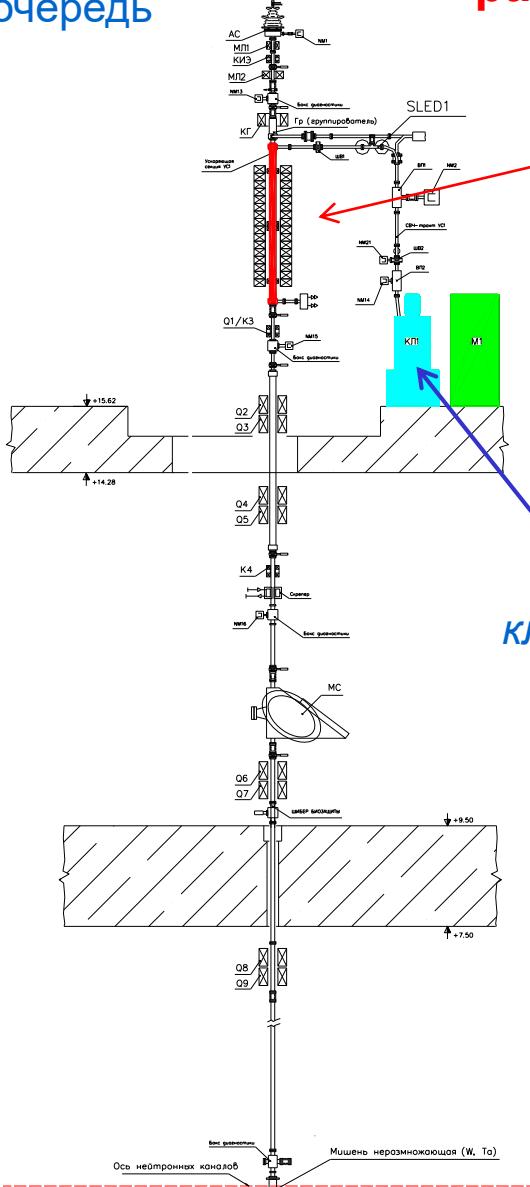
УС



I-я очередь

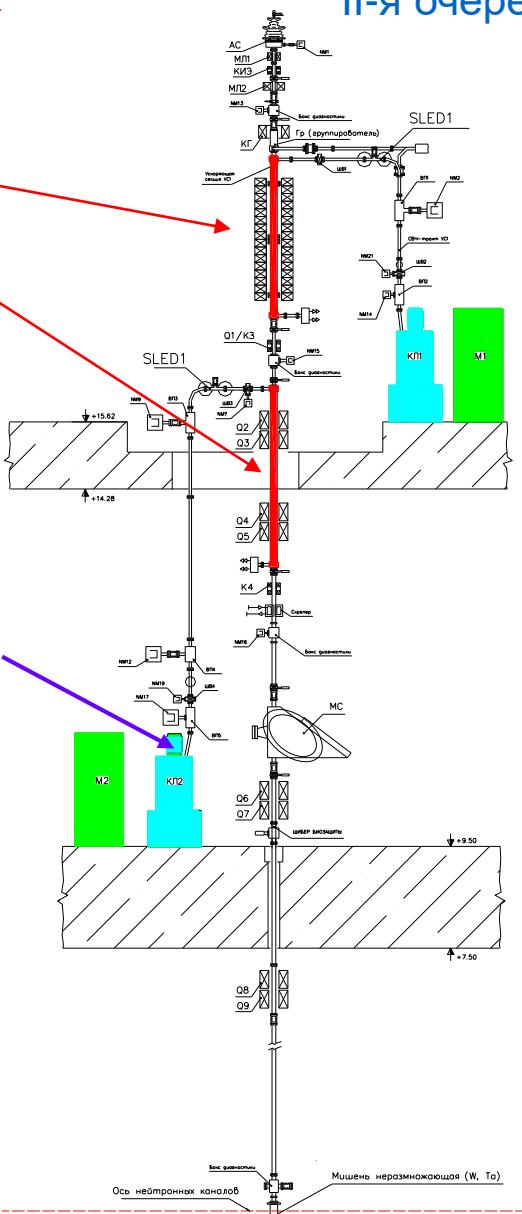
развитие

II-я очередь



УС

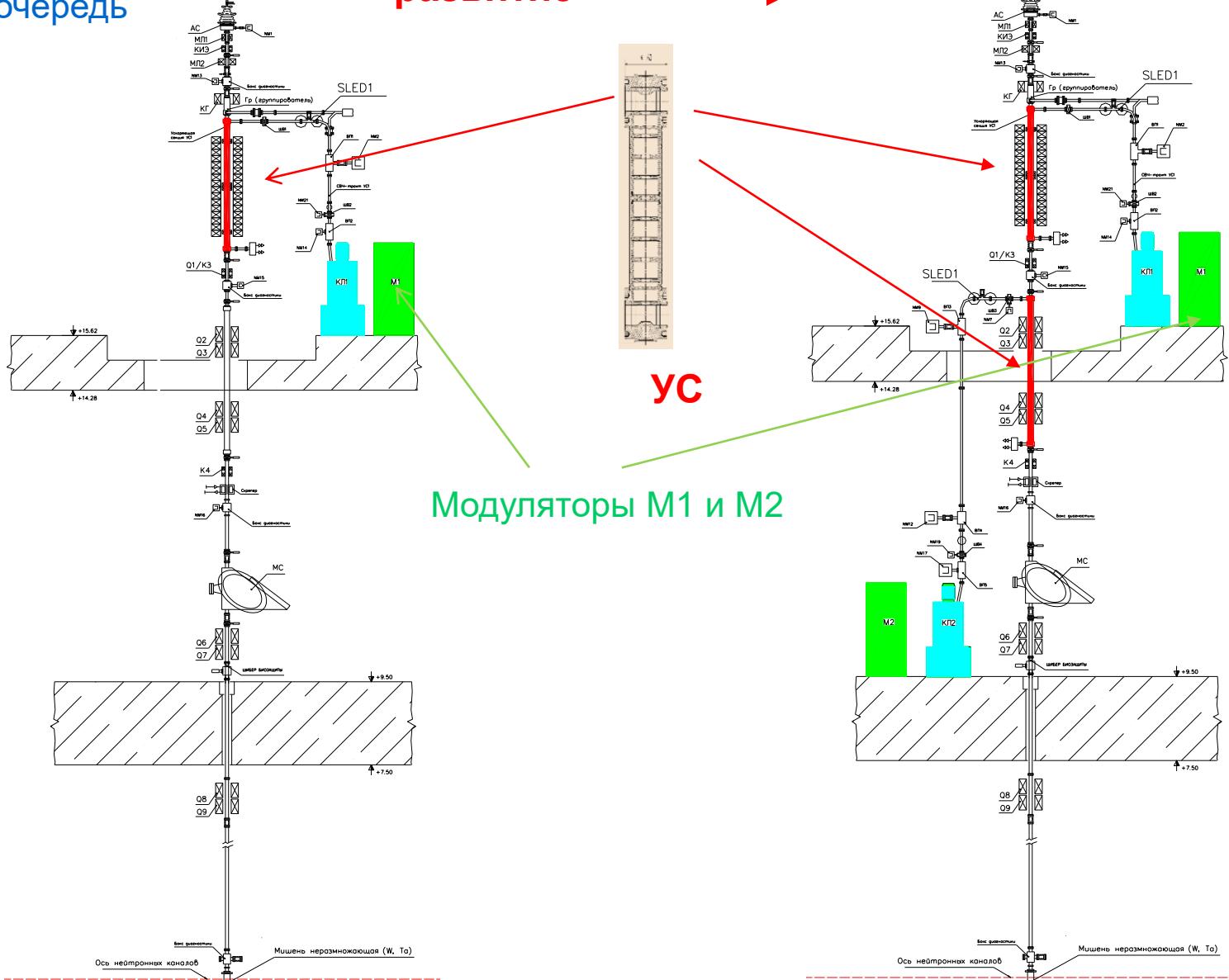
TH2129  
Thomson



I-я очередь

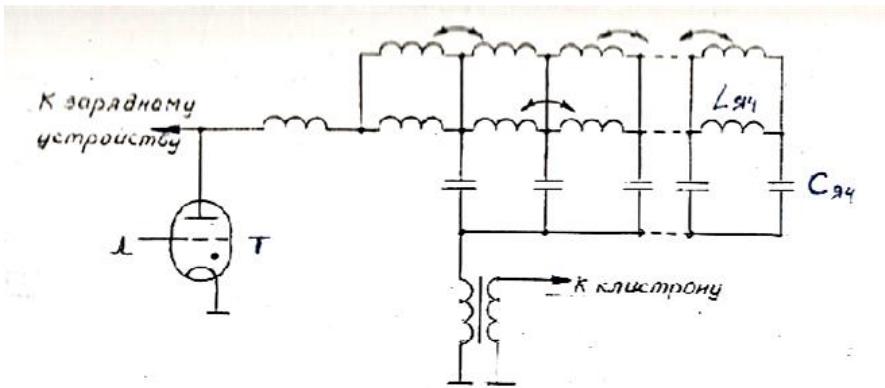
развитие

II-я очередь

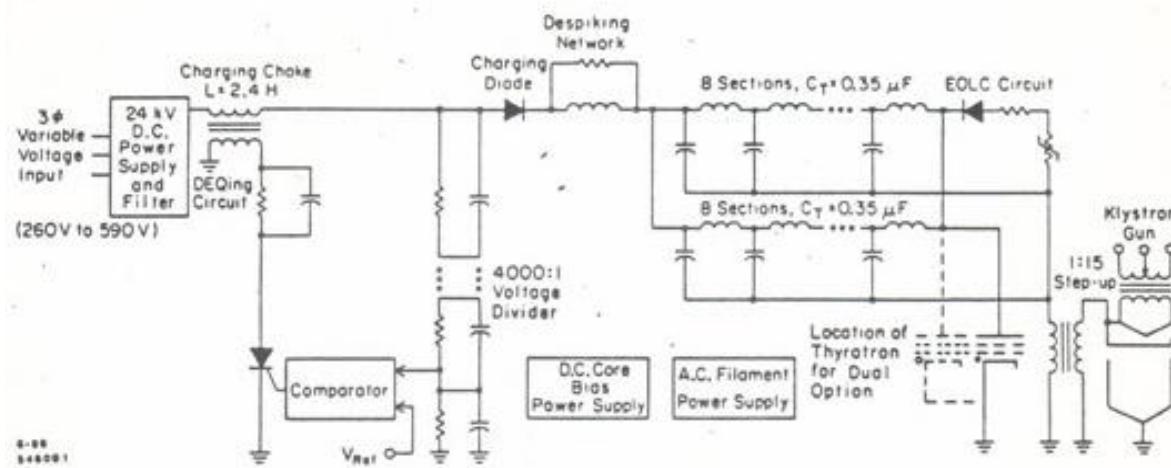


# Модуляторы клистронов

прототипы



Модулятор Оливин (M-250, M350)

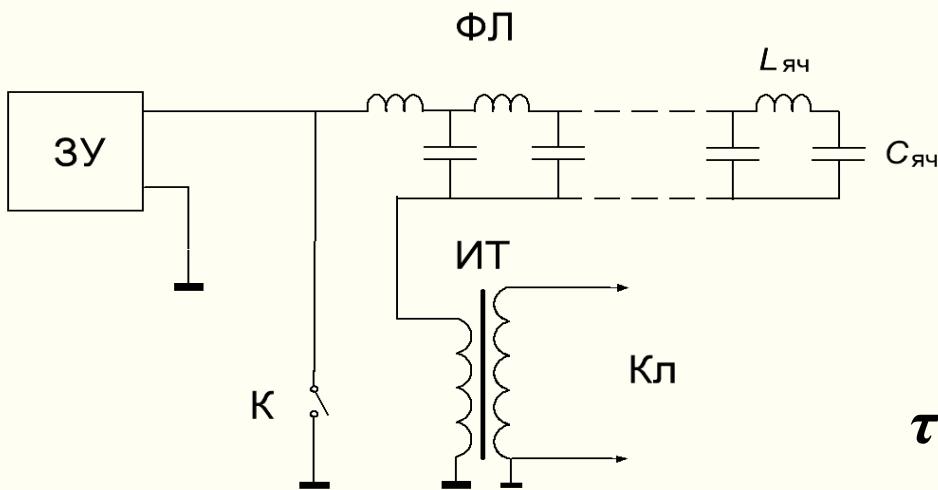


Модулятор SLAC  
для клистрона 5045

# Варианты клистронов для ЛУЭ-200

Параметр	5045 SLAC	TH2129 Thomson	E3730A Toshiba	E37340 Toshiba
Напряжение на клистроне $U_{\text{кл}}$ (кВ)	350	240	310	310
Ток пучка клистрона $I_{\text{кл}}$ (А)	400	235	350	350
Напряжение на выходе ФЛ (на первичной обмотке трансформатора) $U_1 = U_{\text{кл}} / k_{\text{тр}}$ (кВ)	23.5	16	20.7	20.7
Зарядное напряжение ФЛ $U_{\text{ФЛ}}$ (кВ)	47	32	41.4	41.4
Общее волновое сопротивление ФЛ $\rho_{\text{ФЛ}}$ (Ом)	3.888	4,53	3.94	3.94
Длительность импульса по уровню 0.5 (мкс)	5.5	5.5	5.5	5.5
Частота циклов (Гц)	до 150 Гц	до 150 Гц	до 50 Гц	до 150 Гц
Импульсный ток через ФЛ (через коммутатор) (кА)	6.044	3.53	5.254	5.254
Средний ток через коммутатор (А)	$\approx 5$	$\approx 2.9$	$\approx 1.4$	$\approx 4.3$
Импульсная мощность, передаваемая в нагрузку (МВт)	141	56.5	108.7	118.4
Средняя мощность модулятора, передаваемая в нагрузку (кВт)	116.3	46.6	29.8	97.7

# Модуляторы клистронов



$$\rho_{\text{фл}} = ? \quad L_{\text{яч}} = ? \quad C_{\text{яч}} = ?$$

$$\kappa_{\text{тр}} = 15, \quad U_{\text{фл}} = 2U_{\text{кл}} / \kappa_{\text{тр}}$$

$U_{\text{фл}} = 32 - 44$  кВ в зависимости от конкретного клистрона

$$\tau_i \geq \tau_{\text{свч}} = 3.5 \text{ мкс}, \quad \tau_{\text{фи}} \leq 0.1 \tau_{\text{свч}}$$

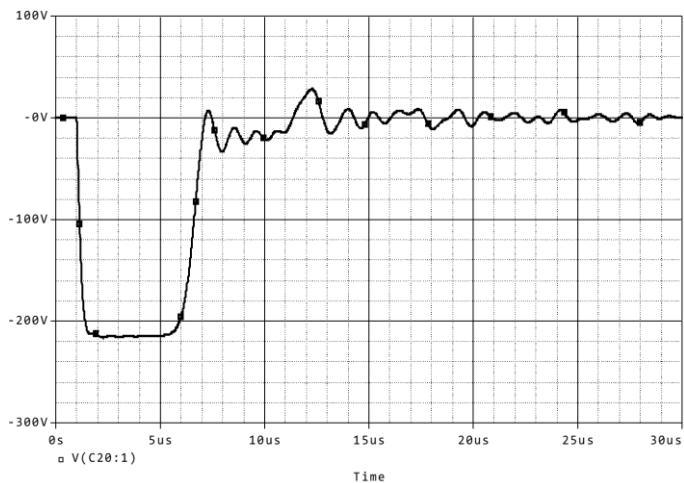
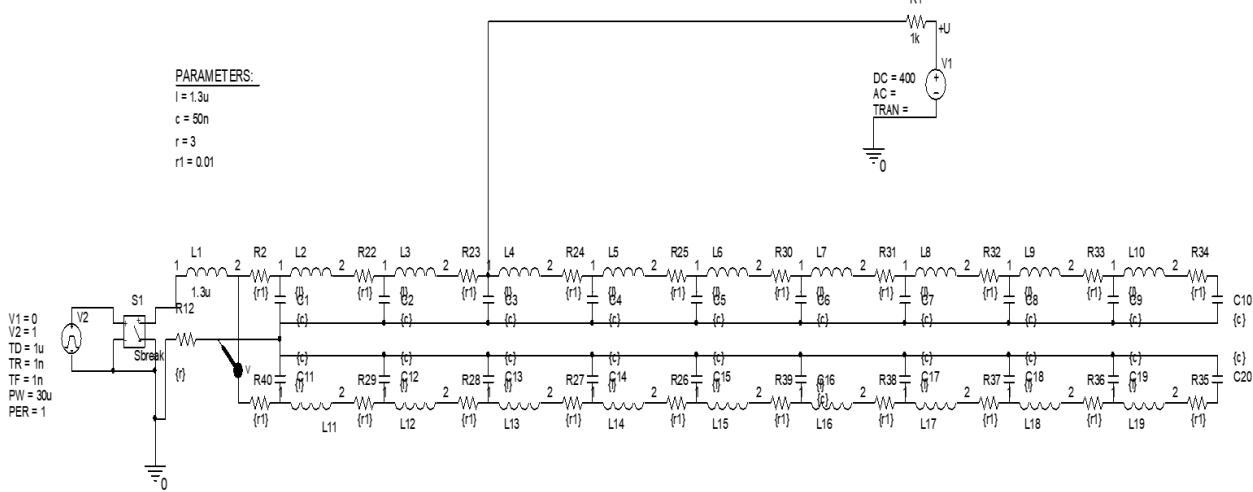
Глэшоу, Брейтбарт, Ихоки

$$\rho_{\text{фл}} \approx Z_{\text{ИТ}} = Z_{\text{кл}} / \kappa_{\text{тр}}^2, \quad Z_{\text{кл}} = U_{\text{кл}} / I_{\text{кл}} \quad \rho_{\text{фл}} \approx U_{\text{кл}} / (I_{\text{кл}} \kappa_{\text{тр}}^2)$$

$$\rho_{\text{фл}} = (L_{\text{яч}} / C_{\text{яч}})^{1/2} \quad \tau_i \geq 2n_{\text{яч}} (L_{\text{яч}} C_{\text{яч}})^{1/2} = 3.5 \text{ мкс}$$

# Модуляторы клистронов

## Моделирование ФЛ (PSpice)



Две ФЛ, включённые  
параллельно с  $n_{яч} \geq 10$

$$C_{яч} = 50 \text{ нФ}$$

$$L_{яч} = 0.7 - 4.0 \text{ мкГн}$$

# К выбору конденсаторов для модуляторов клистронов

## Требования к конденсаторам ФЛ

- режим работы импульсный,
  - номинальное зарядное напряжение ≤ 50 кВ,
  - разрядный импульсный ток через конденсатор ≥ 7 кА,
  - испытательное напряжение ~ 80 кВ DC,
  - допустимый уровень переполюсовки до 50%,
  - средний ток ≥ 10 А,
  - частота циклов до 150 Гц,
  - ёмкость одной ячейки  $C_{яч} = 50 \text{ нФ}$
  - Ресурс по числу циклов заряд/разряд  $10^{11}$  циклов

# К выбору тиратронов для модуляторов

Тип тиратрона	Макс. прямое напряжение анода (кВ)	Макс. амплитуда тока в импульсе (кА)	Средний ток анода (А)	Максимальная частота циклов (Гц)	Тип охлаждения	Ресурс (час)
ТГИ1-2500/50 (Идеал)	50	2.5	4	400	вода	не менее 1000
ТГИ1-5000/50 (Исполин)	50	5.0	10	2700	вода	не менее 1000
ТГИ1-5к/50 (г. Рязань)	40	5.0	2.5	300	воздух	не менее 1000
ТГИ2 10к/50 (г. Рязань)	45	6	6	200	воздух	не менее 1000
CX1836A (E2V)	50	10	10	10 000	воздух	не менее 10000
CX2412A (E2V)	50	15	15 (40)	5 000	воздух	не менее 10000
L4888 (LITTON)	55	15	8	Нет информации	Нет информации	Нет информации

# Общее ТЗ к модуляторам

Напряжение на клистроне	$U_{\text{кл}}$ (кВ)	<b>240 – 350</b>
Ток катода клистрона	$I_{\text{кл}}$ (А)	<b>235 - 400</b>
Напряжение на выходе ФЛ (на первичной обмотке трансформатора) $U_1 = U_{\text{кл}} / k_{\text{тр}}$ (кВ)		<b>16 – 23.5</b>
Зарядное напряжение ФЛ	$U_{\text{ФЛ}}$ (кВ)	<b>32 – 47</b>
Общее волновое сопротивление ФЛ $\rho_{\text{ФЛ}}$ (Ом)		<b>3.888 – 4.53</b>
Длительность импульса по уровню 0.5 (мкс)		<b>5.5</b>
Частота циклов	(Гц)	<b>до 150 Гц</b>
Импульсный ток ФЛ (через коммутатор) (кА)		<b>3.53 – 6.5</b>
Средний ток через коммутатор (А)		<b><math>\approx 1.4 – 6</math></b>
Импульсная мощность, передаваемая в нагрузку (МВт)		<b><math>\geq 150</math></b>
Средняя мощность модулятора, передаваемая в нагрузку (кВт)		<b><math>\geq 135</math></b>

# **Модуляторы клистронов**

**ScandiNova (Finland)**

**НАНОИНВЕСТ (Москва)**

**ТИРА (РИМР, НПО им. Коминтерна С.-Петербург)**

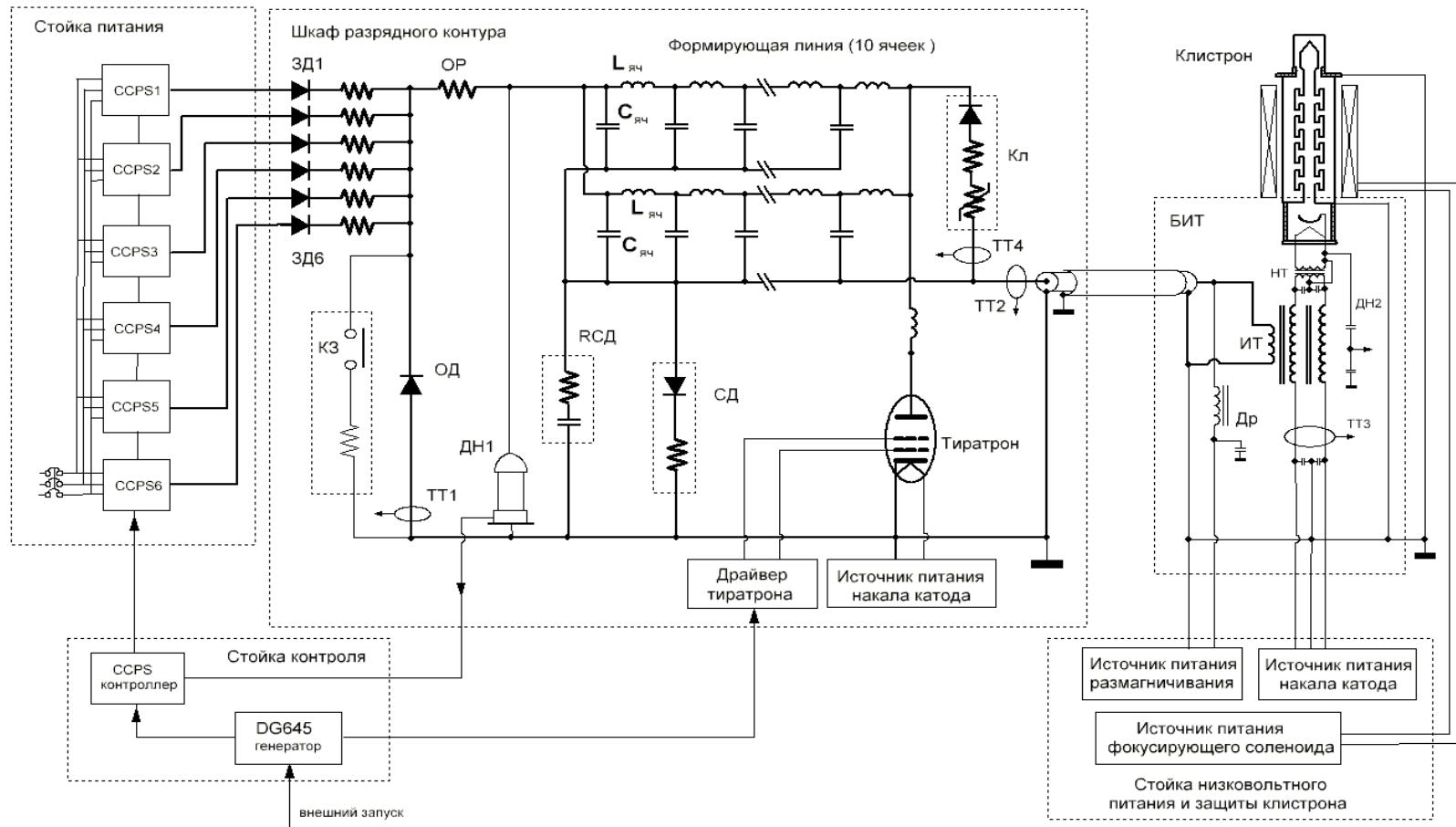
**Diversified Technology (USA)**

**DAWONSYS (Korea) :**

- **совместно с зарядным устройством инверторного типа**
- **соотношение цены / качество**

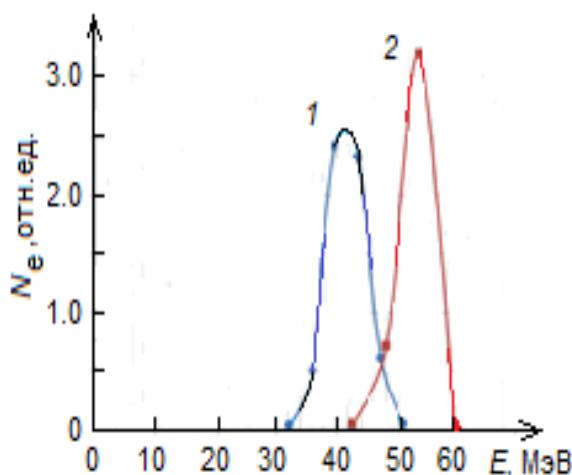
# Модуляторы клистронов

Dawonsys - Модулятор 180 МВт / 180 кВт

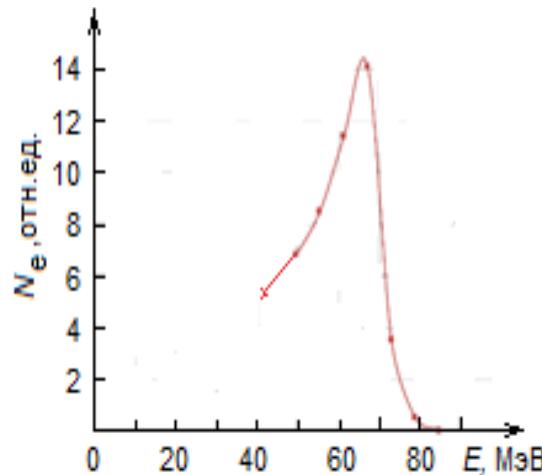


Поставлены в 2014 г., запущены в 2015 г.

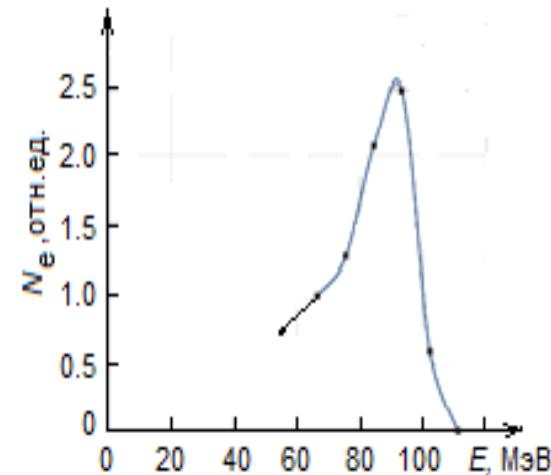
**ЛУЭ-200, вторая очередь,  
(1-й кл. - 30 Мвт + 2-й кл. - 17 Мвт)  
Запуск – 2016 – 2017 год.**



2017г.

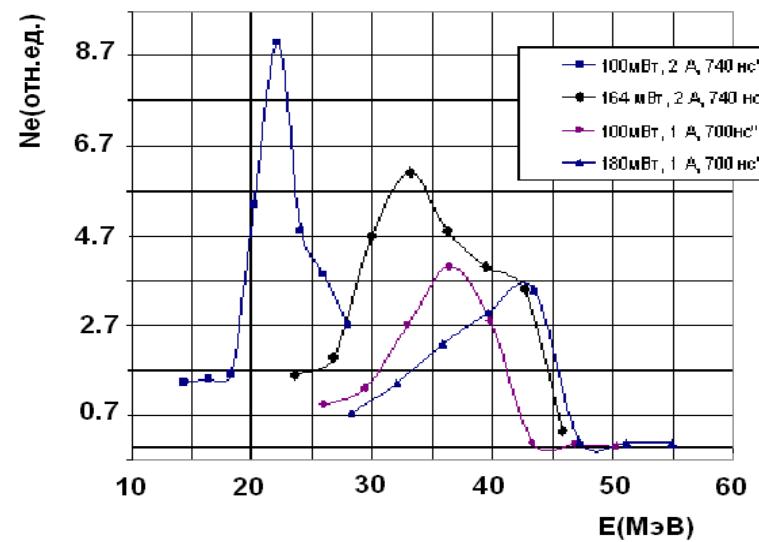


2019г.



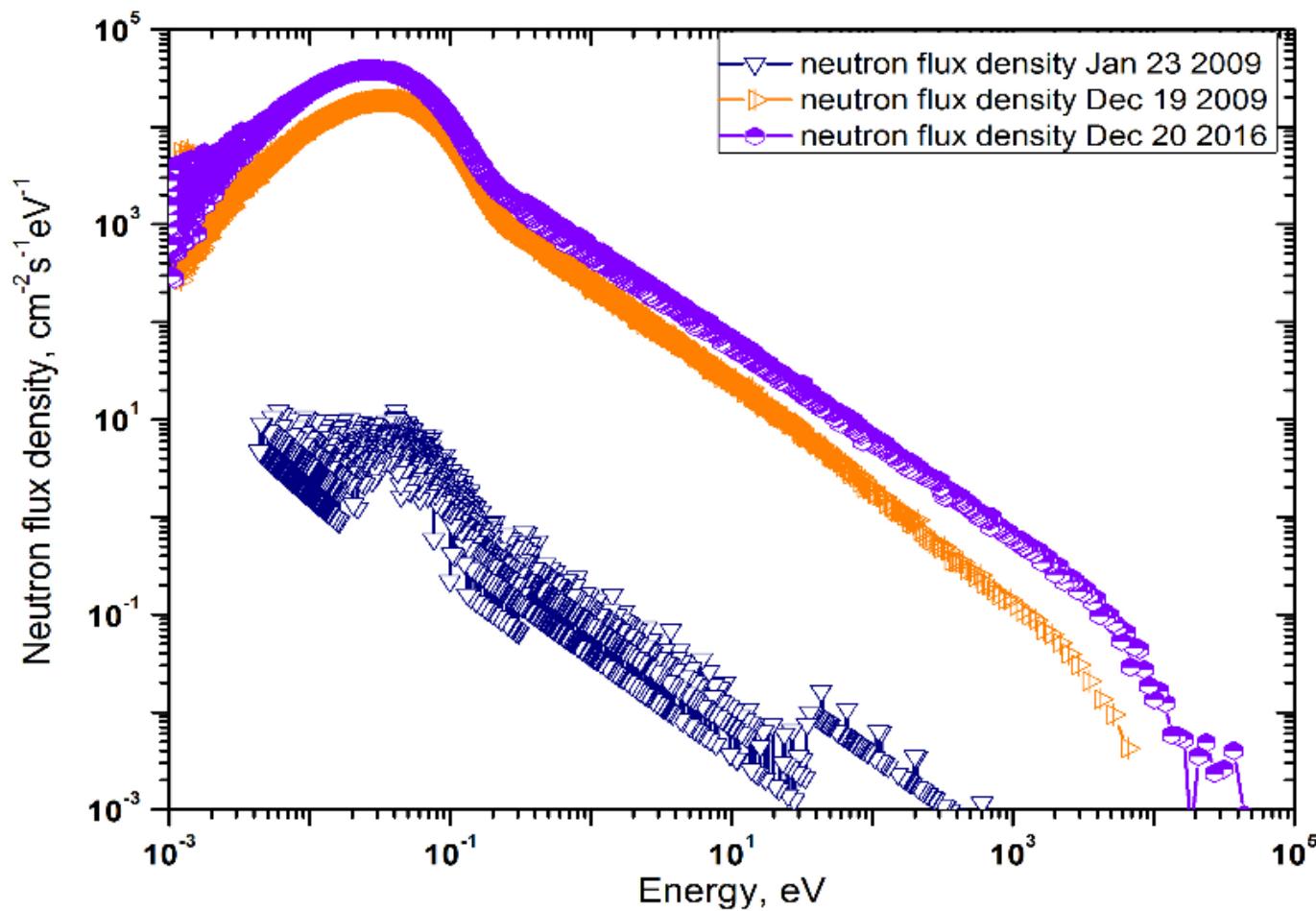
2019г., предельно малые  
токи пучка

**ЛУЭ-200, первая очередь  
(один клистрон, Ркл = 17 Мвт)  
2010 – 2015 гг.**



# Параметры линака: I-я очередь (2010-2015 гг.), II-я очередь (2017-2021 гг.)

	I-я очередь	II-я очередь реализация	
Количество ускоряющих секций (количество клистронов)	<b>1 секция</b> (1 клистрон)	<b>2 секции</b>	
		<b>1-я секция</b>	<b>2-я секция</b>
Тип клистрона, мощность клистрона максимальная	<b>2129 Thomson</b> <b>20 МВт</b>	<b>E3730A Toshiba</b> <b>50 МВт</b>	<b>TH2129 Thomson</b> <b>20 МВт</b>
Мощность клистрона реализованная	<b>17 МВт</b>	<b>30 МВт</b>	<b>17 МВт</b>
Средняя/максимальная энергия электронов	<b>35/42 МэВ</b>	<b>62 МэВ/70 МэВ</b>	
Средний ток пучка в импульсе	<b>1.5 А</b>	<b>1.5 - 2.0 А</b>	
Длительность токового импульса	<b>100 нс</b>	<b>100 нс</b>	<b>100 нс</b>
Частота циклов	<b>25 Гц</b>	<b>25 - 50 Гц</b>	
Средняя мощность пучка	<b>0.131 кВт</b>	<b>0.24 кВт - 0.6 кВт (50 Гц)</b>	



Вторая очередь  $N_n \sim 10^{11} - 10^{12}$  сек<sup>-1</sup>

# Проблемы проектных параметров ЛУЭ-200

1. Прохождение пучка: пушка – мишень 30 – 40 %  
группирователь + 1-я секция < 52 %,

*Вопросы к группирователю*

2. Мощность пучка ниже расчётной на ~ 30%

Энергия пучка ниже расчётной на ~ 30%

*подгрузка ускоряющего поля пучком,*

3. Ограничение на величину мощности, вводимой в ускоряющие секции:

*Электрическая прочность ускоряющих структур ниже проектной*

ЛФЧ (ЛФВЭ) ОИЯИ группа Александрова В.С.

МИФИ (Москва) группа Полозова С.М.

ИЯФ СО РАН (Новосибирск) группа Левичева А.Е.

## **1. Группирователь. Выводы**

**1. Короткий группирователь работает без пространства дрейфа. Продольная модуляция плотности пучка в группирователе развивается недостаточно эффективно.**

**2. Фазовая протяжённость сгустков близка к  $\pi$ .**

**Из-за отсутствия необходимого синхронизма СВЧ поля первой секции с банчами пучка, у сгустков возникают длинные «хвосты» и широкий энергетический спектр, что приводит к дальнейшим потерям пучка в первой секции.**

**3. Недостаточная эффективность группирователя требует инжектирования в первую ускоряющую секцию пучка с током, превышающим номинальный ток ускорителя, что, в свою очередь, ещё более увеличивает подгрузку ускоряющей структуры и приводит, в конце концов, к значительному снижению энергии пучка и размытию энергетического спектра.**

## 2. Подгрузка ускоряющего поля пучком

**В соответствии с фундаментальной теоремой о нагрузке резонатора током электрическое поле в ускоряющей структуре:**

$$E_z(z) = E_0 e^{-\alpha z} - I_0 R_{sh}(1 - e^{-\alpha z})$$

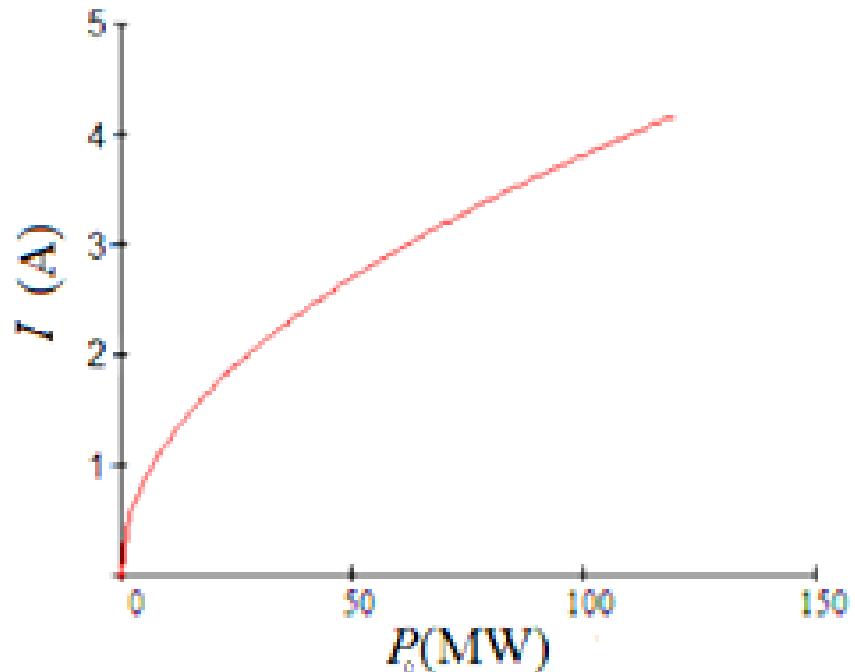
**$E_0$  – амплитуда поля, возбуждённого генератором  
 $\alpha$  - коэффициент потерь в стенках ускоряющих ячеек  
 $R_{sh}$ - шунтовое сопротивление структуры  
 $I_0$  – ток пучка**

**при увеличении тока пучка  $I_0$  напряжённость индуцированного поля будет возрастать и может достичь такой величины, которая сравняется с напряжённостью поля, возбуждённого генератором – «критический ток пучка»**

## 2. Подгрузка ускоряющего поля пучком

Критический ток для ускоряющих секций ИЯФ типа:

$$I_{cr} = \sqrt{\frac{2\alpha P_0}{R_{sh}}} \frac{1 - e^{-\alpha L}}{\alpha L - (1 - e^{-\alpha L})}$$



Величина тока ускоряемого пучка ( $\sim 2$  А) оказывается меньше значений критического тока для ускоряющих структур данного типа, поэтому нагрузка пучком ускоряющих полей в секциях ускорителя понижает энергию ускоренного пучка, но это понижение не имеет подавляющего характера

## 2. Подгрузка ускоряющего поля пучком

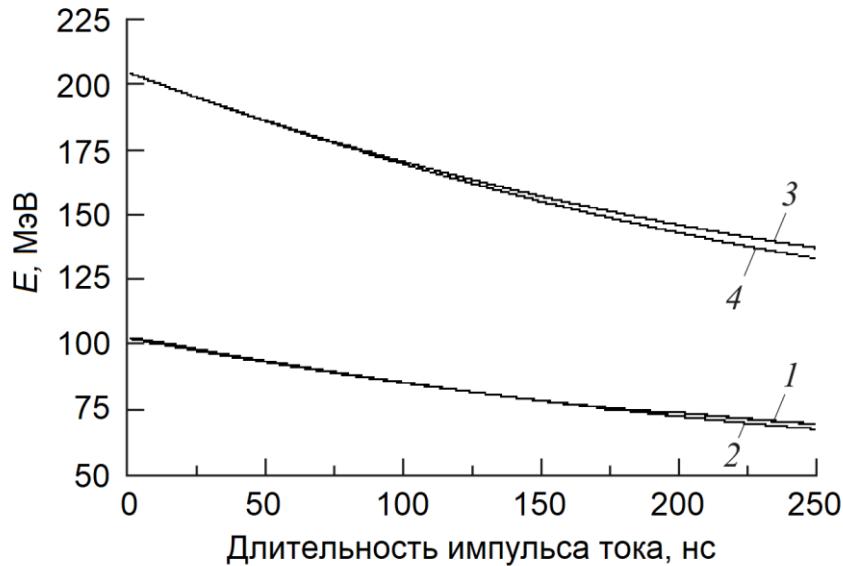
$$E(\tau) = eU(\tau) = eU_m + e\Delta U_b(\tau) \quad U_m = U_0(1 - e^{-\alpha z})/\alpha$$

$$U_0 = (2\alpha R_{sh} P_0)^{1/2} \quad P_0 - \text{мощность генератора}$$

$$\Delta U_b(\tau) = -R_{sh} L I_0 \left\{ \left( 1 - \frac{\tau_{0A}}{T_f} \right) \left[ 1 - e^{-\tau/\tau_{\alpha 0}} \right] + \frac{\tau}{T_f} e^{-\tau/\tau_{\alpha 0}} \right\}.$$

## 2. Подгрузка ускоряющего поля пучком

с проектными параметрами: (2А, 250 нсек, уск. градиент 35 МВ/м)

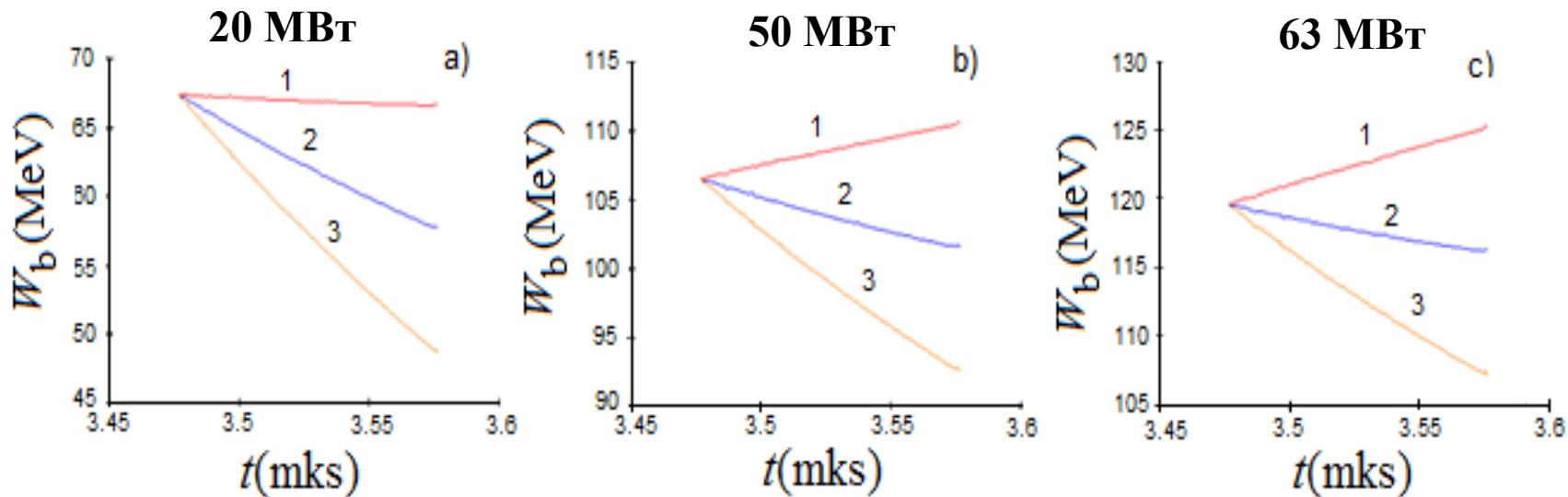


**Изменения энергии пучка в зависимости от длительности импульса тока:**

- после первой секции (кривые 1 и 2)
- после второй секции (кривые 3 и 4)

## 2. Подгрузка ускоряющего поля пучком, длительностью 100 нсек

$$W(z) = e \int_0^z E_z(z) dz = e[(E_0 + I_0 R_{sh}) \frac{1 - e^{-\alpha z}}{\alpha} - I_0 R_{sh} z]$$



**Полная энергия пучка в одной ускоряющей секции при различных значениях мощности генератора и силы тока пучка:**

$$1 - I_b = 1\text{A}, \quad 2 - I_b = 2\text{A}, \quad 3 - I_b = 3\text{A}$$

- a) 20 МВт (TH2129 + SLED),
- b) 50 МВт (E3730A + SLED),
- c) 63 МВт (5045 SLAC + SLED),

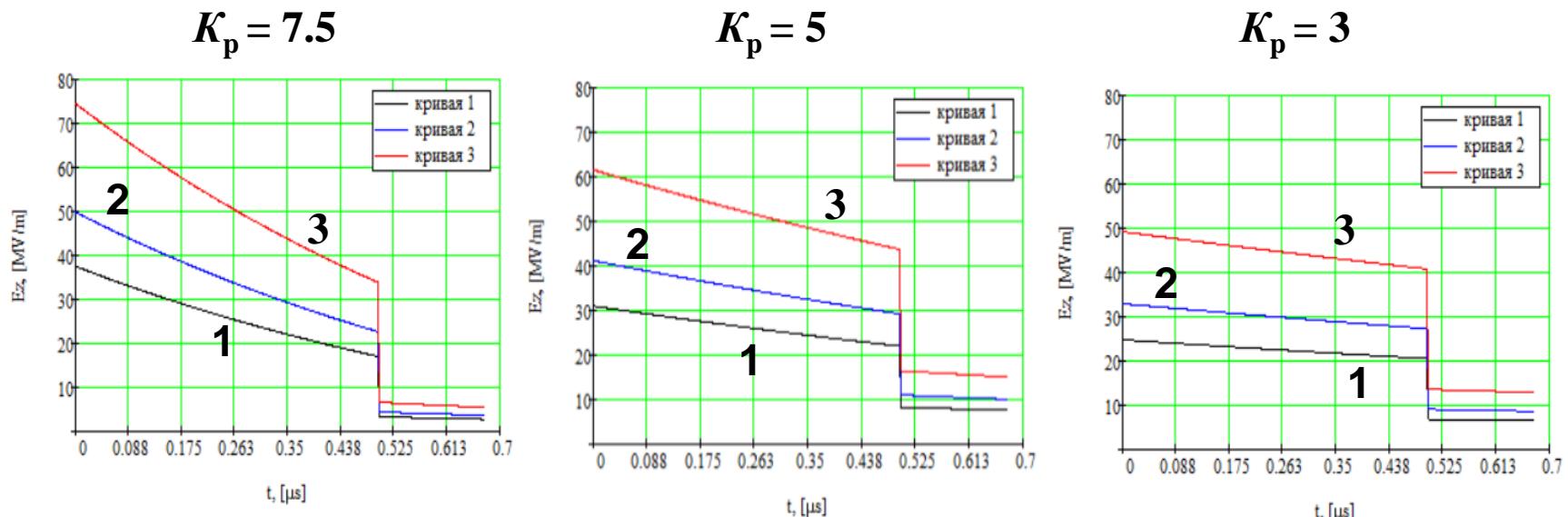
## **2. Подгрузка ускоряющего поля пучком**

### **Выводы:**

- 1. Нагрузка секций ЛУЭ-200 ускоряемым пучком оказывает существенное влияние на динамику пучка и его параметры на выходе ускорителя с потерями энергии пучка до 20% - 25 %.**
- 2. Эффективность ускоряющей структуры с использованием системы SLED существенно падает при увеличении длительности импульса тока пучка.**

### 3. Электрическая прочность ускоряющих структур

Напряжённости электрических полей на оси в начале ускоряющей структуры в зависимости от времени при  $I_0 = 0$  для клистронов различной мощности и для различных коэффициентов усиления по мощности системы SLED  $K_p$



кривая 1 - мощность клистрона = 17 МВт,

кривая 2 – 30 МВт,

кривая 3 – 67 МВт,

- 30 - 37 МВ\м

- 40 - 50 МВ\м

60 – 75 МВ\м

на оси

на оси

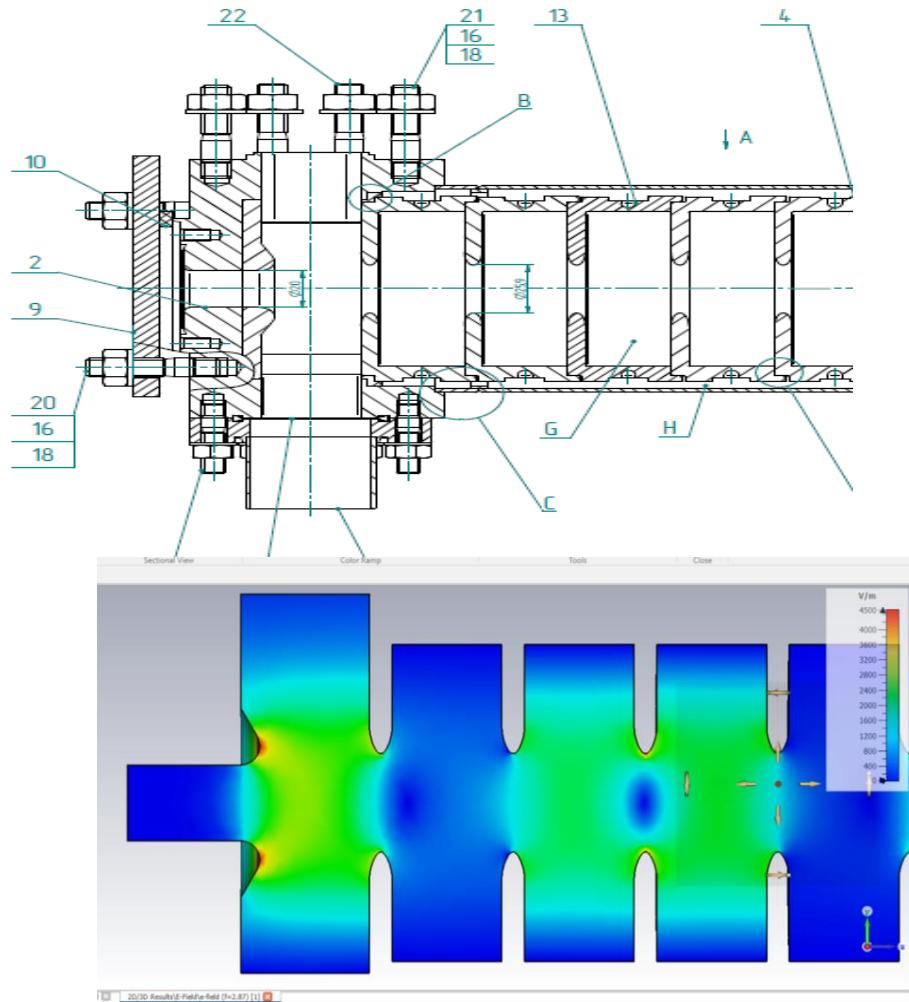
на оси

# *К вопросу об электрической прочности ускоряющих структур*

## Паспортные параметры ускоряющей секции ИЯФ

Параметры	Значение
Рабочая частота (при T= 25 C°)	2855.05 МГц
Температурный коэффициент изменения рабочей частоты	0.05 МГц/град.
Время заполнения ускоряющей структуры	0,471 мкс
Шунтовой импеданс на единицу длины	51 МОм/м
Коэффициент перенапряжения $K_V$	1.7
Длина ускоряющей секции, включая трансформаторы типа волны (2 шт.)	2930 мм
Число ускоряющих ячеек в секции, включая трансформаторы типа волны (2 шт.)	83 + 2
Максимальный ускоряющий градиент	40 МэВ/м

$$E_{\text{поверх}} = 1.7 E_{\text{на оси}}$$



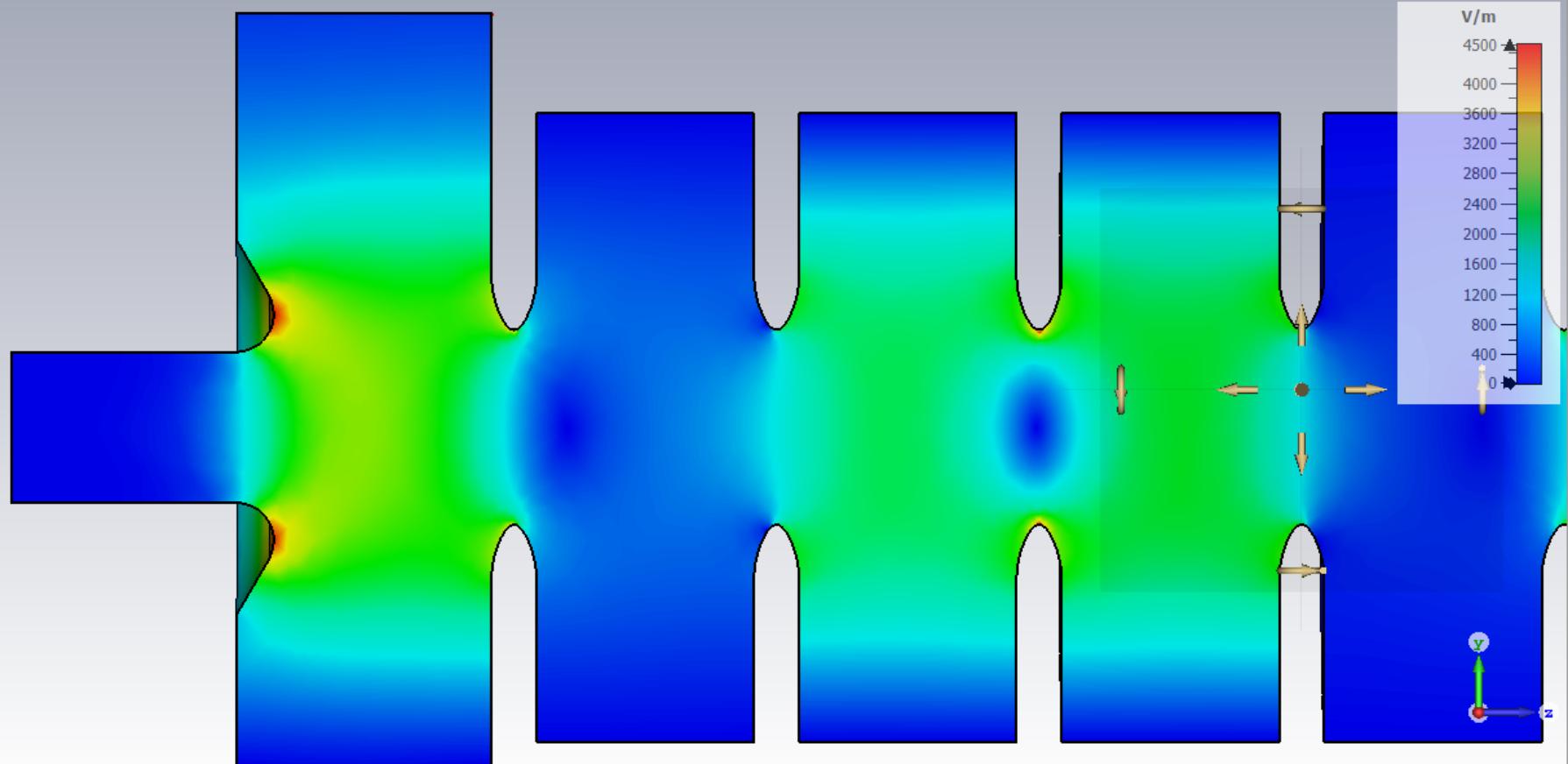
Левичев А.Е. (ИЯФ)  
Барняков А.М. (ИЯФ)

Sectional View

Color Ramp

Tools

Close



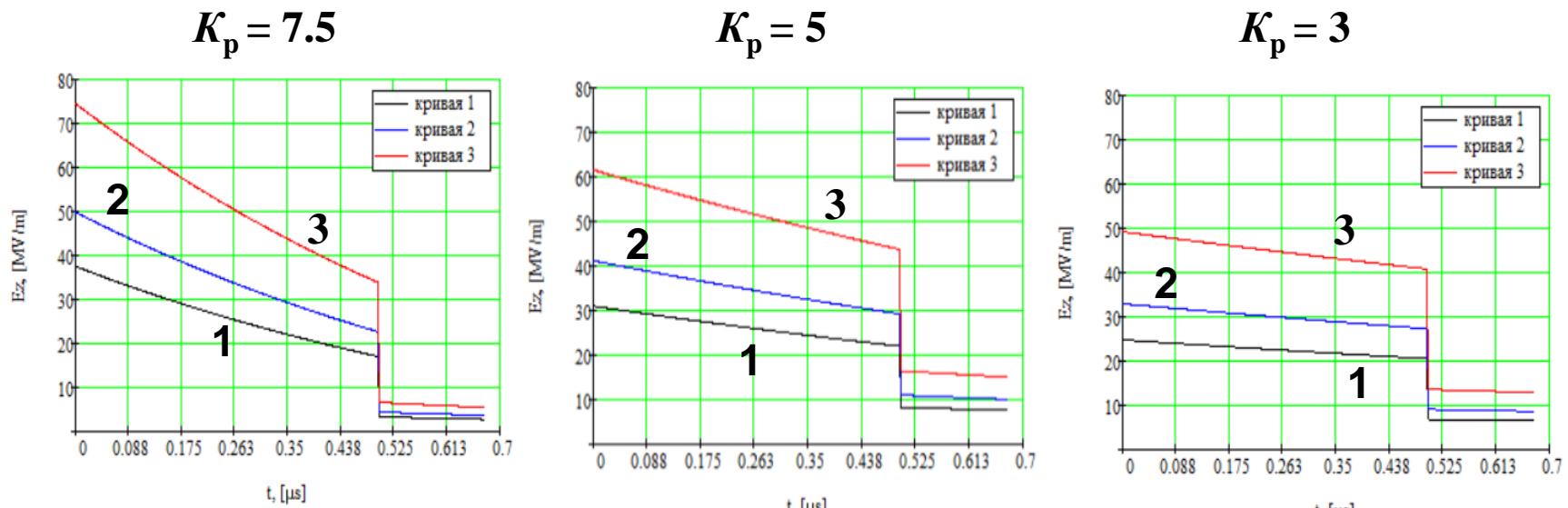
2D/3D Results\{E-Field\}e-field (f=2.87) [1]

$$E_{\text{поверх}} = 1.7 E_{\text{на оси}}$$

Левичев А.Е. (ИЯФ)  
Барняков А.М. (ИЯФ)

### 3. Электрическая прочность ускоряющих структур

Напряжённости электрических полей на оси в начале ускоряющей структуры в зависимости от времени при  $I_0 = 0$  для клистронов различной мощности и для различных коэффициентов усиления по мощности системы SLED  $K_p$



кривая 1 - мощность клистрона = 17 МВт,

кривая 2 – 30 МВт,

кривая 3 – 67 МВт,

-  $30 - 37 \text{ MB}\backslash\text{m}$   $\times K_V$

-  $40 - 50 \text{ MB}\backslash\text{m}$   $\times K_V$

-  $60 - 75 \text{ MB}\backslash\text{m}$   $\times K_V$

### 3. Электрическая прочность ускоряющих структур

Критерий Килпатрика (Лос – Аламос, 60-70 гг.)

$$f(\text{MHz}) = 1.64 E_K^2 e^{-8.5/E_K}$$

where  $f$  is the frequency, and  $E_K$  in megavolts per meter is known as the *Kilpatrick limit*. This is plotted in Fig. 5.14. Note that for a given frequency,

Wangler, Thomas (2008). RF Linear Accelerators (2<sup>nd</sup> ed.). Wiley-VCH. ISBN [978-3-527-62343-3](#), p.163.

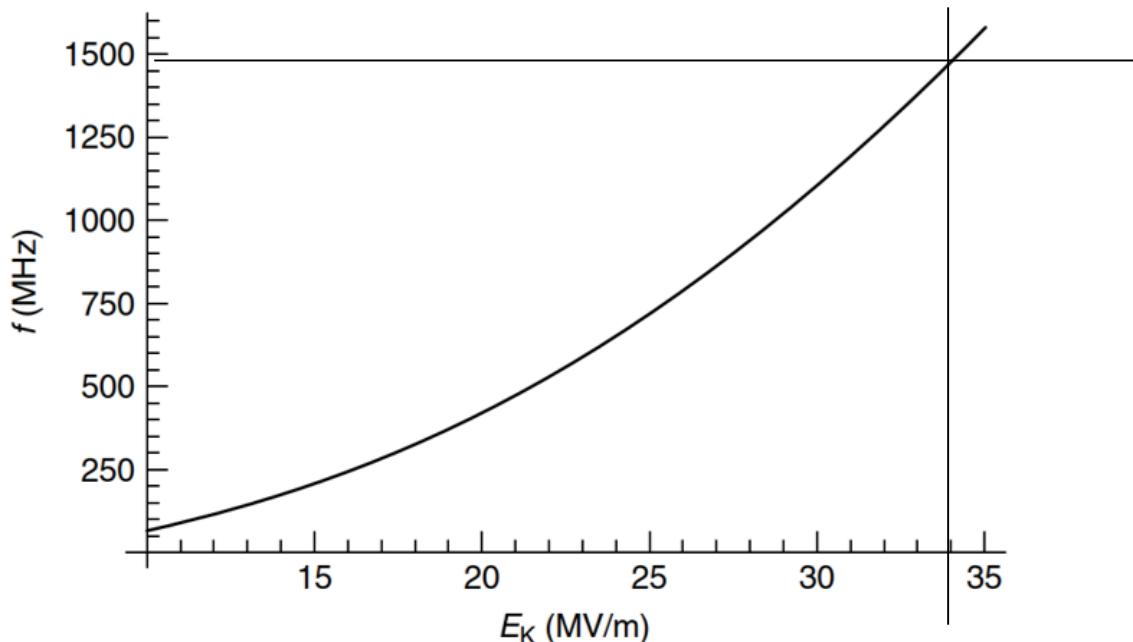


Figure 5.14 The Kilpatrick formula from Eq. (5.80).

Для частоты 2856 МГц  
 $E_K = 34 \text{ MV/m} \cdot 1.4 = \mathbf{47.6 \text{ MV/m}}$

### **3. Электрическая прочность ускоряющих структур**

Для клистрона Е3730А (1-я секция, 30 МВт) и  $K_p = 5$   
 $E_{\text{поверх}} = 68 \text{ МВ/м}$  (I – я секция )

Для клистрона ТН2129 (2-я секция, 17 МВт) и  $K_p = 5$   
 $E_{\text{поверх}} = 51 \text{ МВ/м}$  (II – я секция )

Проект ИЯФ

Для клистрона 5045 (67 МВт) и  $K_p = 7$

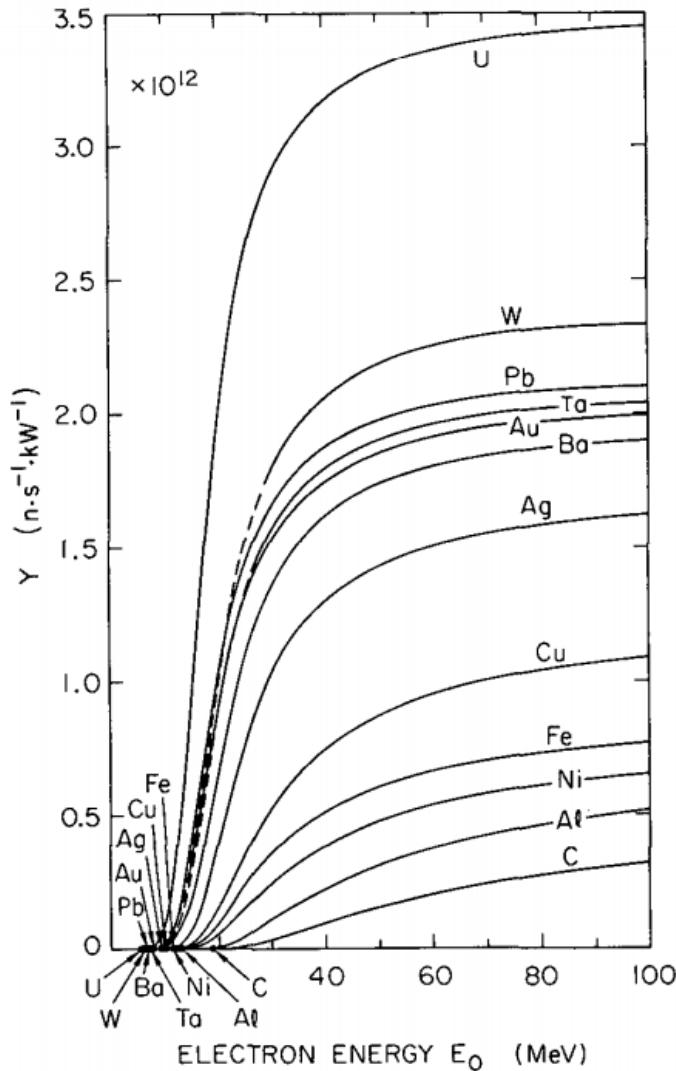
$E_{\text{поверх}} = 102 - 110 \text{ МВ/м}$

**Вывод:** для проектных параметров на поверхности ускоряющих структур формируются электрические поля, с напряжённостью, превышающей пределы Килпатрика

## Текущие параметры ЛУЭ-200:

Количество ускоряющих секций (количество клистронов)	2 секции	
	1-я секция	2-я секция
Тип клистрона, мощность клистрона максимальная	E3730A Toshiba 50 МВт	TH2129 Thomson 20 МВт
Мощность клистрона реализованная	30 МВт	17 МВт
Средняя/максимальная энергия электронов	62 МэВ/70 МэВ	
Средний ток пучка в импульсе	1.5 - 2.0 А	
Длительность токового импульса	100 нс	100 нс
Частота циклов	25 - 50 Гц	
Средняя мощность пучка	0.24 кВт - 0.6 кВт (50 Гц)	

## Выход нейтронов $Y_n$ в фотоядерных реакциях от энергии пучка электронов $E_0$ для мишеней различных материалов на единицу мощности пучка



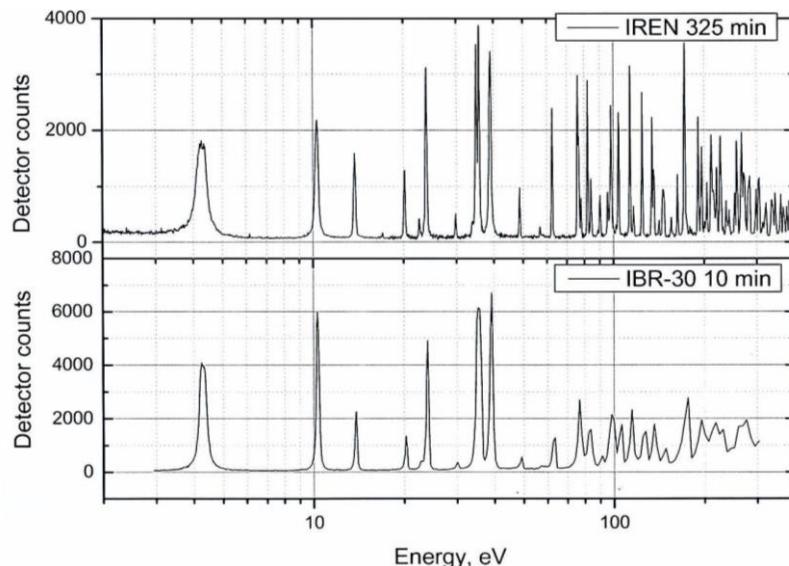
$$N_n \approx Y_n P_b (\text{kW}),$$

где  $Y_n$  – выход нейтронов в секунду на один киловатт мощности пучка,  
 $P_b (\text{kW})$  – мощность пучка электронов.

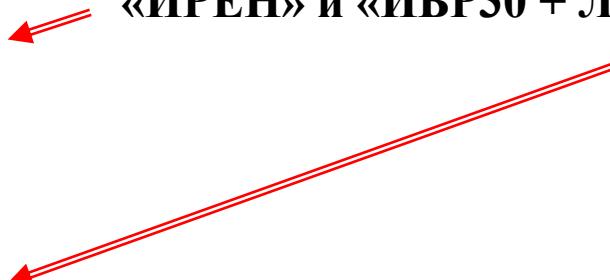
Для  $W$  мишени  $Y_n = 2.2 \cdot 10^{12} \text{ сек}^{-1} \text{ кВт}^{-1}$

# Выход нейтронов источника «ИРЕН»

- при энергии электронов  $E_0 = 35$  МэВ и мощности пучка **0.131 кВт**  
**(первая очередь ускорителя)**  $N_n \approx 2.0 \cdot 10^{12} P_b(\text{kW}) \text{ сек}^{-1} \text{ кВт}^{-1}$  или  
$$N_n \approx 2.6 \cdot 10^{11} \text{ сек}^{-1},$$
- при энергии электронов  $E_0 = 70$  МэВ и мощности пучка **0.412 кВт**  
**(вторая очередь ускорителя)**  $N_n \approx 2.2 \cdot 10^{12} P_b(\text{kW}) \text{ сек}^{-1} \text{ кВт}^{-1}$  или  
$$N_n \approx 0.9 \cdot 10^{12} \text{ сек}^{-1}.$$



Сравнение разрешающей способности  
двух источников нейтронов:  
«ИРЕН» и «ИБР30 + ЛУЭ40»



# Основные задачи развития ЛУЭ-200

определенны целью развития установки ИРЕН

- увеличением интенсивности нейтронных пучков

Необходимость увеличения интенсивности нейтронных потоков  
диктует необходимость увеличения мощности пучка электронов

*Проект*  $N_n \sim P_b = E_b I_b t_p f_u = 200 \text{ МэВ} \cdot 1.5 \text{ А} \cdot 250 \text{ нс} \cdot 150 \text{ Гц} = 11.25 \text{ кВт}$

*Текущее состояние*  $= 70 \text{ МэВ} \cdot 1.5 \text{ А} \cdot 100 \text{ нс} \cdot 50 \text{ Гц} = 0.525 \text{ кВт}$

*Развитие*   $= 70 \text{ МэВ} \cdot 2 \text{ А} \cdot 100 \text{ нс} \cdot 100 \text{ Гц} = 1.68 \text{ кВт}$

**Увеличение цикличности** – достигается переходом на клистроны  
с большей средней мощностью (с более высокой цикличностью):

E3730A Toshiba ( $P_{кл AV} = 10 \text{ кВт}$ )  
50 Гц



E37340 Canon ( $P_{кл AV} = 35 \text{ кВт}$ )  
120 - 150 Гц

$$N_n \sim 0.9 \cdot 10^{12} \text{ сек}^{-1} \rightarrow \sim 2.5 \cdot 10^{12} \text{ сек}^{-1}$$

# **Хроника линейного ускорителя ЛУЭ-200**

2005г. Завершение проектирования

в объеме I-й очереди, отказ от использования размножающей мишени

17.06.2008 - первый пучок (от пушки)

23.07.2008 - пучок проведен через первую секцию

05.12.2008г. - зарегистрированы первые нейтроны

февраль 2009г. - физический пуск I-й очереди при 5-10 Гц

май 2009 – июль 2015г. I-я очередь отработала «на мишень»

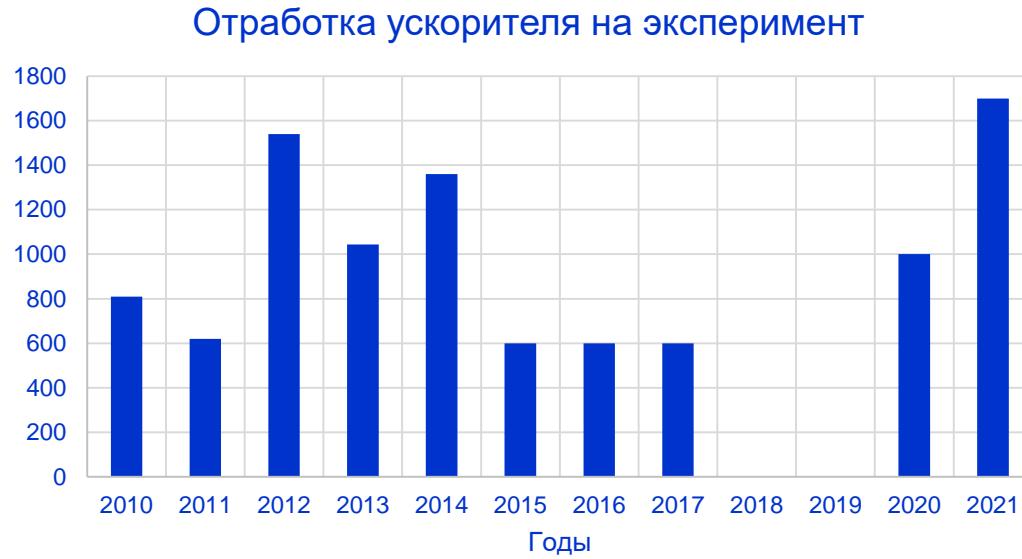
около 6000 час. при частоте циклов 10 – 25 Гц

**2015г. - начало реализации II-й очереди ускорителя**

(2-я секция, 2-й клистрон, 2-модулятор, реконструкция  
системы охлаждения и СТС)

**декабрь 2017г. - физический пуск II-й очереди при 10 - 25 Гц**

2020г. – 2021г. ускоритель отработал > 2500 час. при 25 Гц (50 Гц)



*Всего на эксперимент ускоритель отработал более 8500 час.*

Заключение:

**Ускоритель ЛУЭ-200 состоялся как  
функционирующий драйвер источника ИРЕН**

**Спасибо за понимание !**