

*Новый ист очник нейт ронов – пульсирующий
исследоват ельский реакт ор НЕПТУН в ОИЯИ:
т екущее сост ояние и планы*

М.В. Булавин

ЛНФ им. И.М. Франка ОИЯИ

Международная конференция XVI Забабахинские научные чтения,
29 мая – 02 июня 2023
РФЯЦ-ВНИИТФ,
г. Снежинск

Научная программа реактора НЕПТУН

Параметры импульсного источника, влияющие на постановку ЭНР (10^{13} - 10^{14} н/см²/с, меньше 200 мкс, 10 Гц, фон менее 2-3%):

$$\Phi_p = \Phi_0(T_0/\Delta t_s)$$

Φ_p – поток тепловых нейтронов в импульсе (скважность),

Φ_0 – средний поток нейтронов определяет светосилу спектрометра,

T_0 – период повторения импульса (доступный интервал длин волн),

Δt_s – ширина импульса определяет разрешающую способность спектрометра.

1. ФКС (дифракция, рефлектометрия, МУРН, НР):

- ФТТ: нанокристаллы, низкоразмерные системы, магнетизм и сверхпроводимость
- ХИМИЯ: кинетика in situ новых материалов
- ФЗ и ОС: комплексные минералы при высоких температурах и давлении, геологические процессы
- ИН: неразрушающий контроль инженерных конструкций
- Soft matter (наножидкости), биология (нанобиотехнологии)

2. ФАЯ (свойства нейтрона, параметры распада, его сечение, космология, изучение свойств Вселенной, свойства ядерной материи и фундаментальных взаимодействий, нейтрон-избыточные ядра)

3. НФ (физика за пределами СМ (осцилляции нейтрон-антинейтрон), измерение сечения рассеяния нейтрона на нейтроне, регистрация стерильных нейтрино, УХН)

4. Прикладные (БНЗТ, Радионуклиды, материаловедение и т.д.)

В.Л. Аксенов, М.В. Рзянин, Е.П. Шабалин
«Исследовательские реакторы ОИЯИ: взгляд в будущее»
Журнал Письма в ЭЧАЯ, 2020

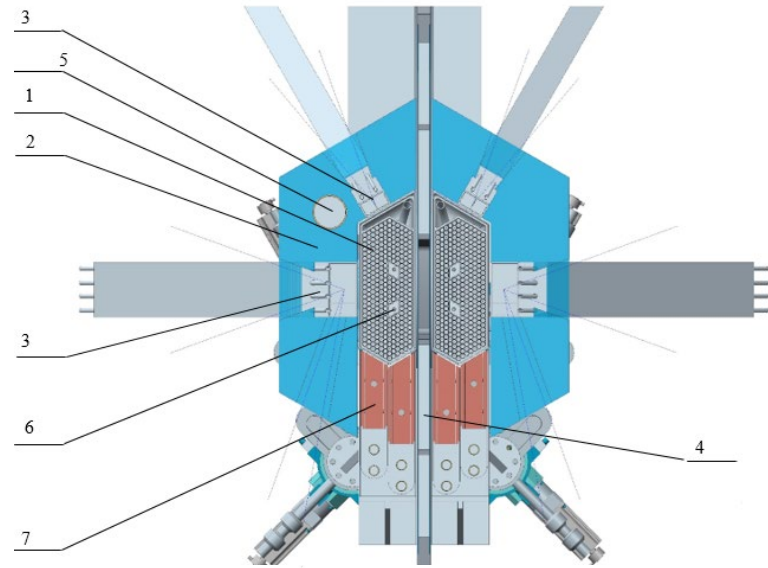
Пульсирующий исследовательский реактор НЕПТУН

Параметр	Значение	
	Активная зона с бесчехловыми ТВС	Активная зона с чехловыми ТВС
Средняя тепловая мощность, МВт	15	
Режим работы	Импульсный	
Частота импульсов, Гц	10	
Топливо	NpN	
Материал оболочки твэла	Сталь ЧС-68-ИД	
Теплоноситель	Na	
Отражатель	Никелевый сплав + бериллий	
Замедлители	Вода	
Температура теплоносителя на входе в активную зону, °С	290	
Температура теплоносителя на выходе из активной зоны, °С	390	
Расход теплоносителя через половину активной зоны, кг/с	58	
Флюенс быстрых нейтронов на корпусе реактора в течение 10000 эфф. ч, см ⁻² : E>0.1 МэВ E>0.5 МэВ	1·10 ²² 3·10 ²¹	1,1·10 ²² 3,8·10 ²¹
Средний ППТН с поверхности водяного замедлителя (Рисунки 6.2 и 6.5) при мощности 15 МВт, 10 ¹³ см ⁻² ·с ⁻¹	9,5 (ВЗ-1)	11,0 (ВЗ-4)
Направленный ППТН на границе водяного замедлителя ВЗ-1 и ВЗ-4 (Рисунки 6.2 и 6.5) с воздухом, отнесённый к телесному углу в 1 ст при мощности 15 МВт (ВЗ1), 10 ¹³ см ⁻² ·с ⁻¹ ·ср ⁻¹	1,8	2,2
Эффективная доля запаздывающих нейтронов	0,0013	
Время жизни мгновенных нейтронов, нс	11	

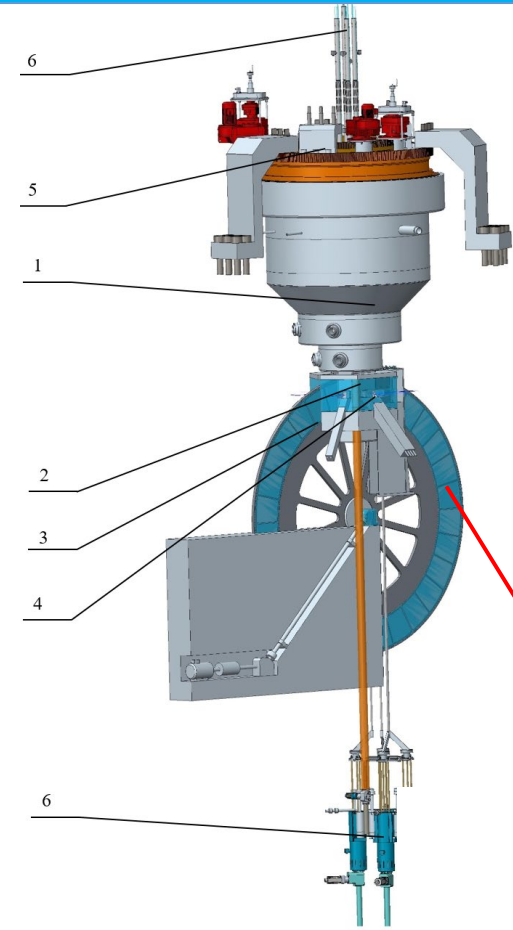
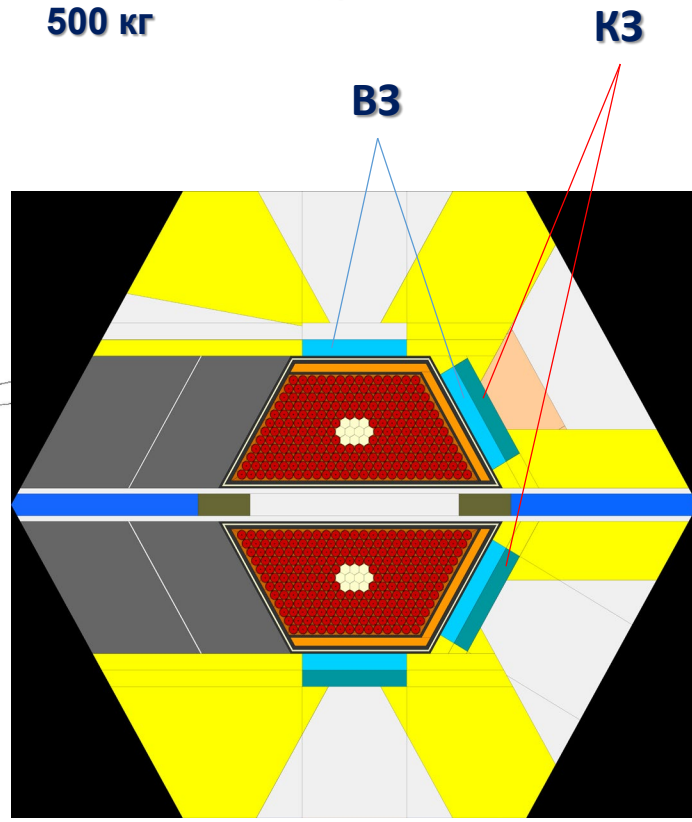
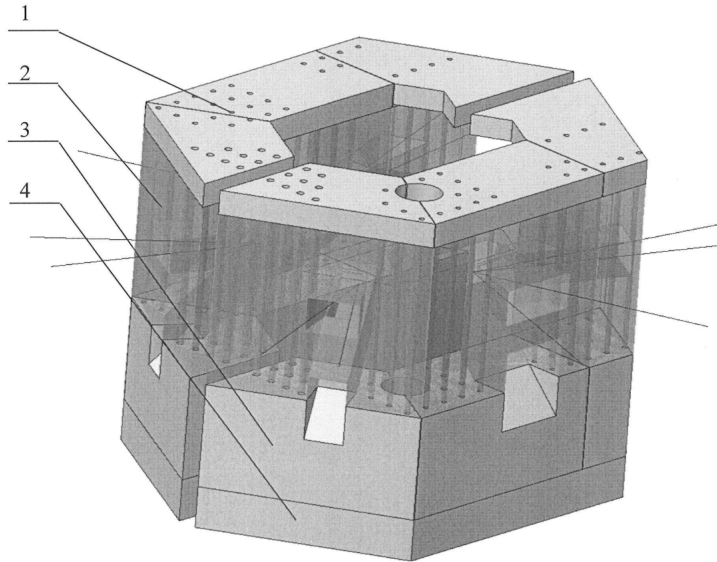
Преимущества ²³⁷Np – пороговый характер сечения деления (эффективный порог деления около 0,4 МэВ), что обеспечивает создание крит массы при достаточной плотности ядер нептуния

- Малое время жизни поколения быстрых нейтронов 3-10 нс – более короткая вспышка (длительность импульса)
- Низкая эффективная доля запаздывающих нейтронов μ (1,2–1,3)· 10⁻³ – малый фон (2-3 %)
- Возможность использования для МР водородосодержащих материалов (вывод водорода из зоны=ввод делящегося вещества)
- Хороший запас реактивности (коэффициент реактивности не снижается от выгорания нептуния)

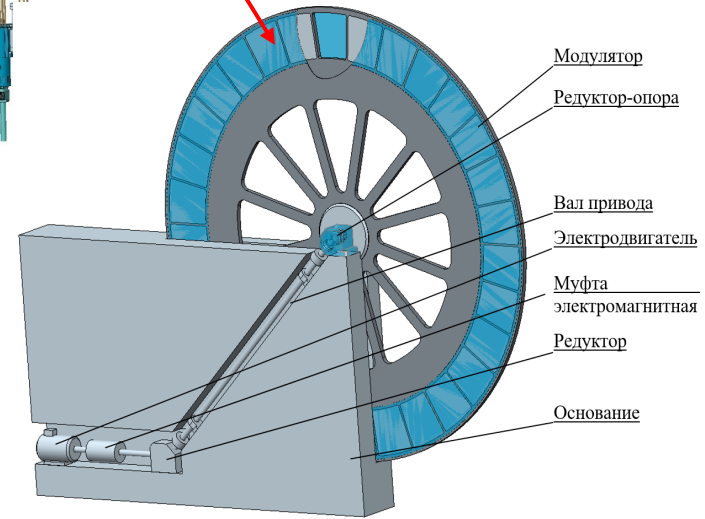
Пульсирующий исследовательский реактор НЕПТУН



- 1 – reactor;
 - 2 – stationary reflector;
 - 3 – reactivity modulator;
 - 4 – moderators;
 - 5 – rotary plugs;
 - 6 – CPS actuators;
 - 7 – RS of RSS
- Мощность 10-15 МВт**
Топливная загрузка 500 кг



- Dimensions:**
- height (including CPS actuators) 14,2 м;
 - core height 3,54 м;
 - core diameter 3,2 м;
 - modulator wheel diameter 3-3,5 м.



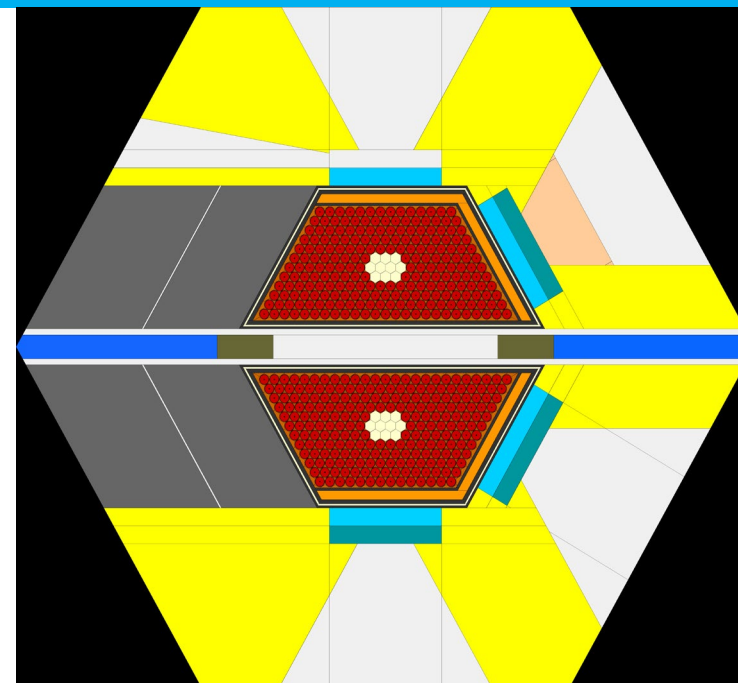
1 – верхний никелевый отражатель; 2 – бериллиевый отражатель;
 3 – нижний никелевый отражатель, 4 – опорный подводящий коллектор
 Рисунок 5.7 – Стационарный отражатель реактора

Научная программа и приборный парк реактора НЕПТУН

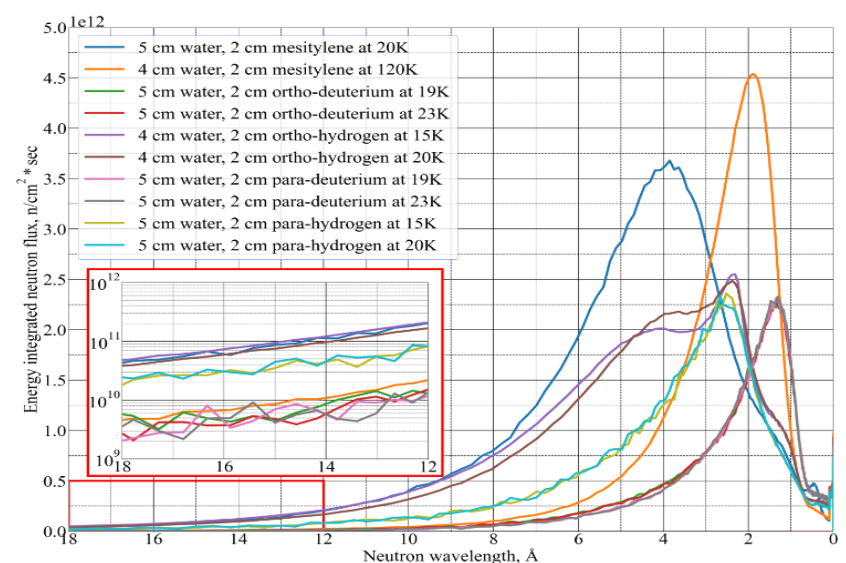
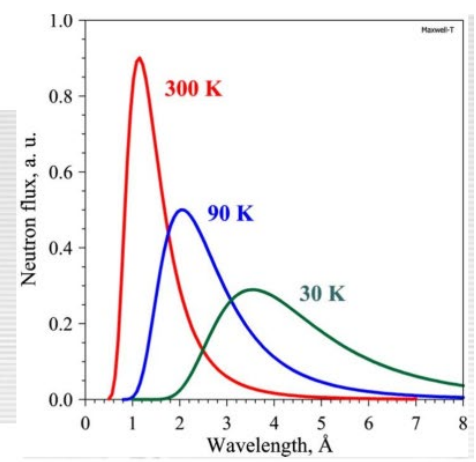
The basic set of neutron TOF spectrometers

	Instrument	Main issue	Moderator	
			T, K	Size
Diffraction	1. Material science*)	Internal stresses	300 K	
	2. High-resolution*)	Crystal structure	300 / 80 K	
	3. High-intensity	<i>In situ</i> , real-time	80 K	
	4. High-pressure	Micro samples	80 K	
	5. Magnetic	Magnetic structure	30 K	
Inelastic	6. Direct geometry-I**)	General purpose	80 K	
	7. Direct geometry-II***)	General purpose	30 K	
	8. Inverse geometry	Molecular systems	80 K	
SANS	9. High-resolution	General purpose	30 K	
	10. High-intensity-I	<i>In situ</i> , real-time	30 K	
	11. High-intensity-II	Micro samples	30 K	
NR Reflect.	12. Horizontal plane	General purpose	30 K	
	13. Vertical plane	Liquid media	30 K	
NR	14. "White" beam	General purpose	30 K	
	15. Energy dispersive	Complex media	30 K	

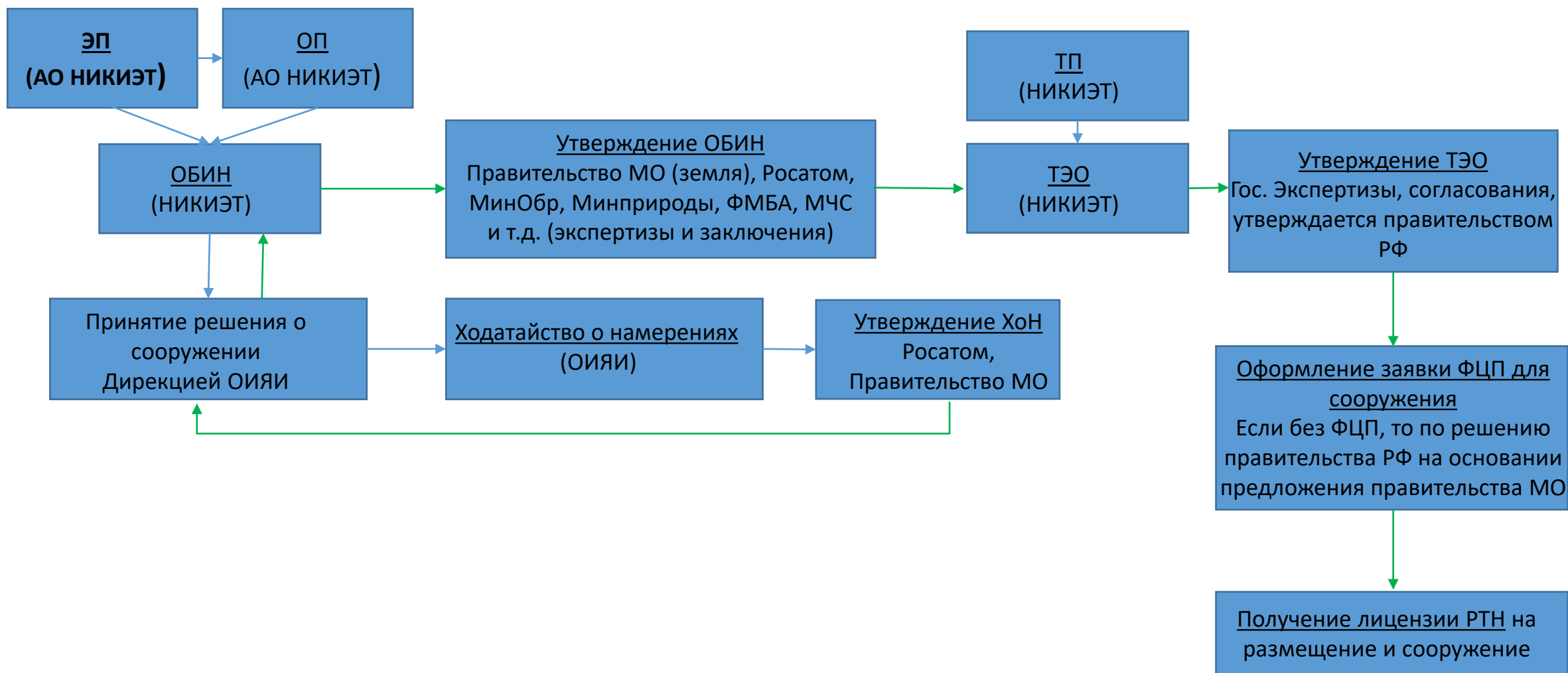
*) Fourier chopper **) Fermi chopper ***) Set of choppers



Moderator	Temperature	λ -range
Thermal	$T \approx 300$ K	$0.8 \div 5$ Å
Cold	$T \approx 80$ K	$1.0 \div 8$ Å
Very cold	$T \approx 30$ K	$2 \div 15$ Å



Последовательность и содержание работ по подготовке принятия решения о размещении и сооружении ИЯУ (ПП РФ №306)



Дорожная карта 2023-2030 (семилетний план развития ОИЯИ)

Project stage	Implementer	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	k\$
1. Preliminary scientific program of neutron research. Determination of the complex of scientific instruments for neutron research with prototyping of individual components	JINR, VNIITF, FEI								
2. Implementation of the R&D program: study of the dynamics of pulsed reactors, optimization of the reactor, development of neptunium-nitride fuel, optimization of the configuration of the moderator complex, development of test stand.	JINR, JSC NIKIET, JSC VNIINM, VNIITF								7500
3. Permit to use and attainment of neptunium nuclear material	JINR, JSC VNIINM								
4. Sketch design project	JSC NIKIET								2600
5. Infrastructure project. Justification of investments. Approval of the location of the reactor.	JSC NIKIET MR Government								3200
6. Feasibility study	JSC NIKIET								3000
7. Decision on the placement and construction of the NEPTUN reactor	JINR RF Government								
8. Technical project	JSC NIKIET								3700
9. Design assignment and development of project documentation	Chief designer								
10. Forming licence supporting materials for reactor placing and reactor containment structure	JINR, JSC NIKIET, Chief designer								
Total, k\$		2400	4000	2700	2600	4500	3100	1000	20 000

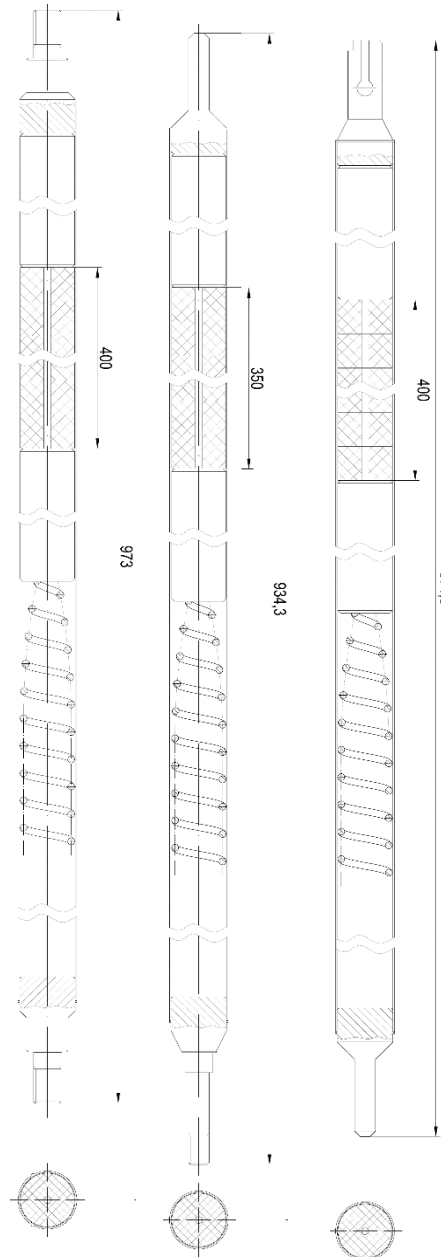
Основные НИОКР, которые необходимо выполнить до начала этапа эскизного проектирования реактора НЕПТУН



Разработка нитрид-нептуниевого топлива и ТВЭЛОВ на его основе

ИПТТ к ТВЭЛАМ реактора НЕПТУН

Параметр	Значение
состав топливной композиции	NpN, (Np,U)N
наружный диаметр топливной таблетки, мм	15,7 _{-0,1} *
* допускается шлифование таблеток по диаметру	
диаметр центрального отверстия, мм	2 ^{+0,1} **
** необходимость наличия центрального отверстия определяется исполнителем	
Высота, мм	определяется исполнителем
физико-химические показатели топливных таблеток	уточняются по результатам технологического опробования исходных материалов
Параметр	Значение
массовая доля суммы изотопов тяжёлых металлов для всех составов топливной композиции, не менее, %	93,6
для топлива состава (Np,U)N массовые доли конкретных изотопов в сумме изотопов тяжёлых металлов (может быть уточнено при расчетах), не менее, %	Np-237 – 50 U-235 – 25
Массовая доля примесей, не более, %	кальций – $2,0 \times 10^{-2}$ магний – $1,5 \times 10^{-2}$ алюминий – $1,5 \times 10^{-2}$ железо – $2,0 \times 10^{-2}$ никель – $2,0 \times 10^{-2}$ хром – $2,0 \times 10^{-2}$ углерод – $1,5 \times 10^{-1}$ кислород – $1,5 \times 10^{-1}$
Массовая доля азота, %	5,2 – 5,6
Плотность таблетки для каждого состава, г/см ³	13,4±0,2
Материал оболочки	Сталь ЧС68-ИД х.д.
Материал концевых деталей	Сталь ЭИ847
Диаметр оболочки, мм	17
Толщина оболочки, мм	0,45
Номинальная длина ТВЭЛА, мм	940 – 980***
*** уточнятся при выполнении работы	
Фиксирование топливного сердечника и отражателей	фиксатор пружинного типа
Подслой	натрий
Дистанционирование ТВЭЛОВ	Навитая эллиптическая проволока, сечением 1,3×0,4 мм
Материал дистанционирующей проволоки	Сталь ЧС68-ИД х.д.



НИОКР: 1) определение технологических диапазонов проведения операции прессования топливных таблеток с использованием имитаторов;

2) технологическое опробование исходных порошков нептуния;

3) отработка технологий изготовления топлива из NpN и (U, Np) N, набор статистических данных при определении характеристик топлива;

4) разработка рекомендаций по корректировке характеристик порошков исходных материалов и исходных технических требований к топливу по результатам технологического опробования и отработки технологии;

5) изготовление экспериментальных образцов топливных композиций и проведение дореакторных исследований топлива из NpN и (U, Np) N.

Техническое предложение реактора НЕПТУН (АО НИКИЭТ)

8 RFA=564 f.r.

21 fuel rods

120 fuel rods

$1.07 \cdot 10^{14}$

RFA has a wrapper (external covering) tube!

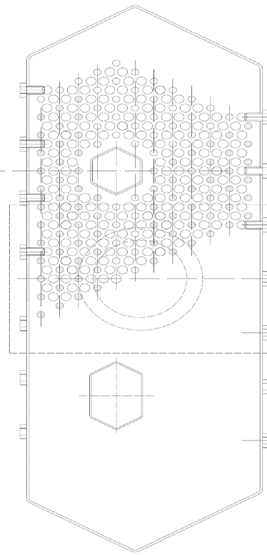
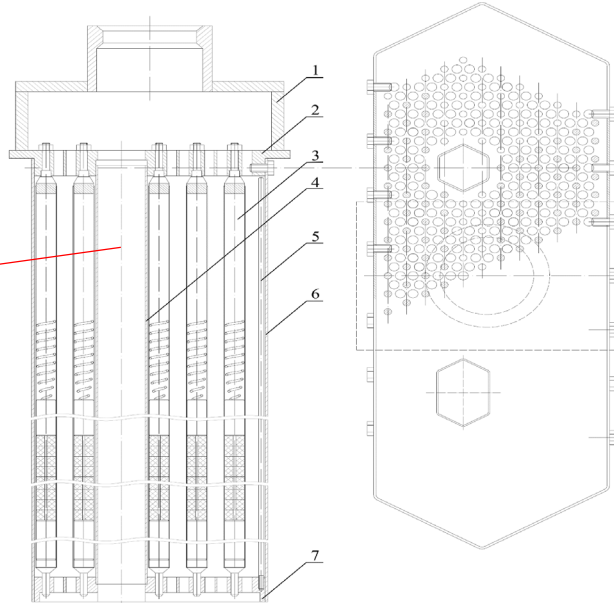
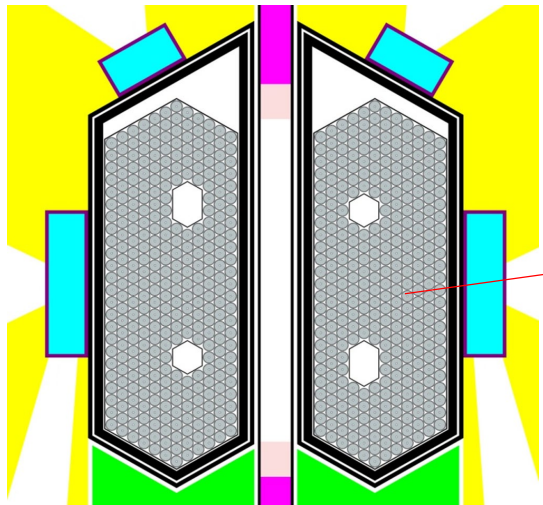
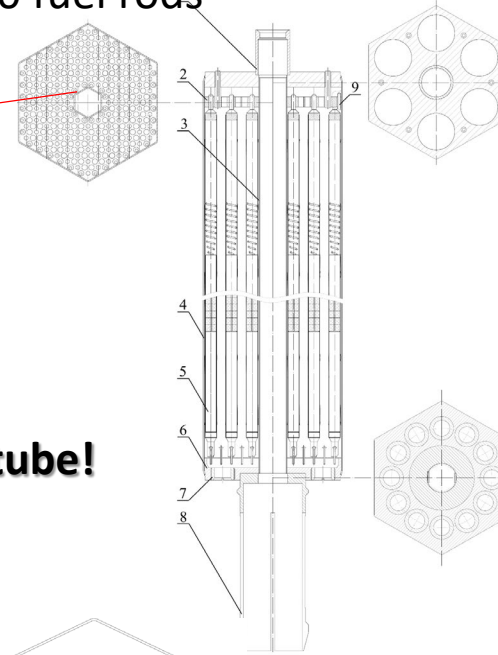
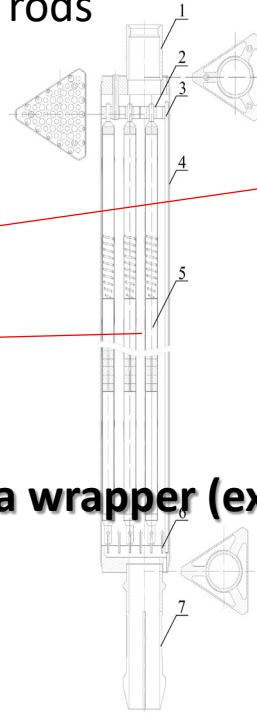
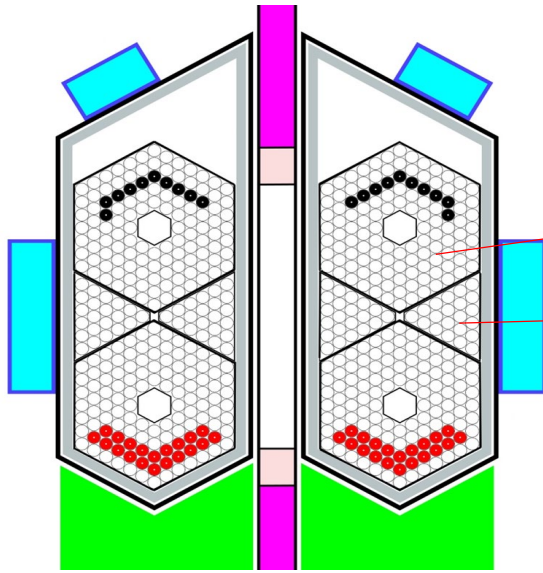
Variant 1

2 RFA=614 f.r.

$1.24 \cdot 10^{14}$

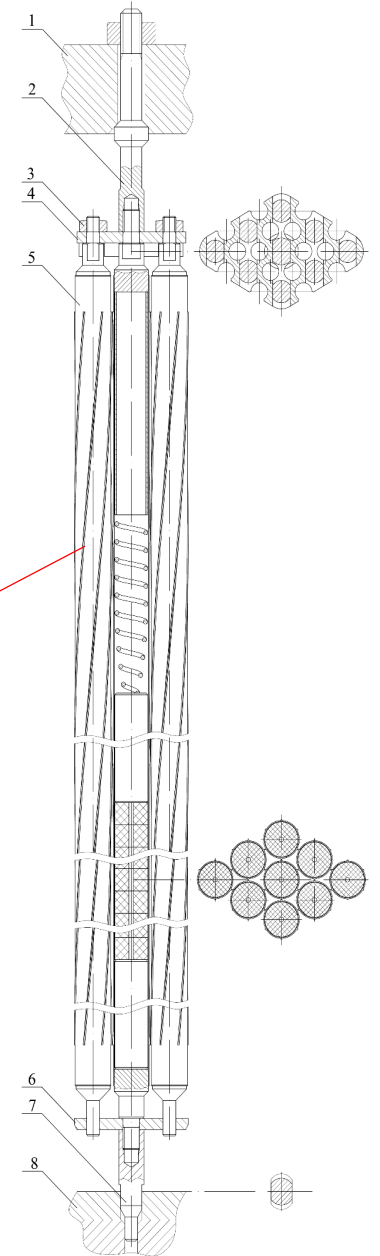
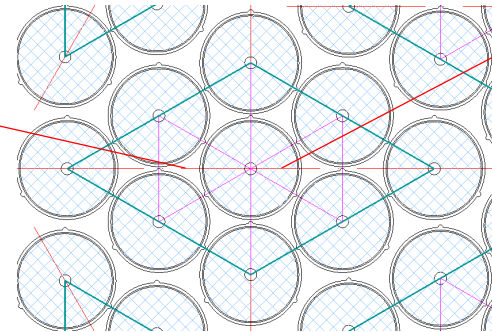
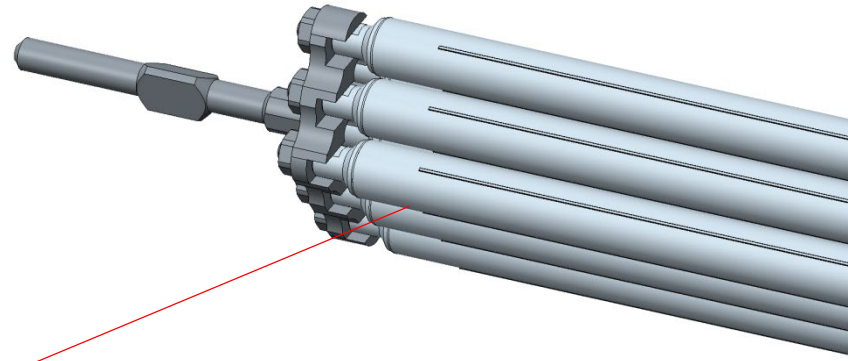
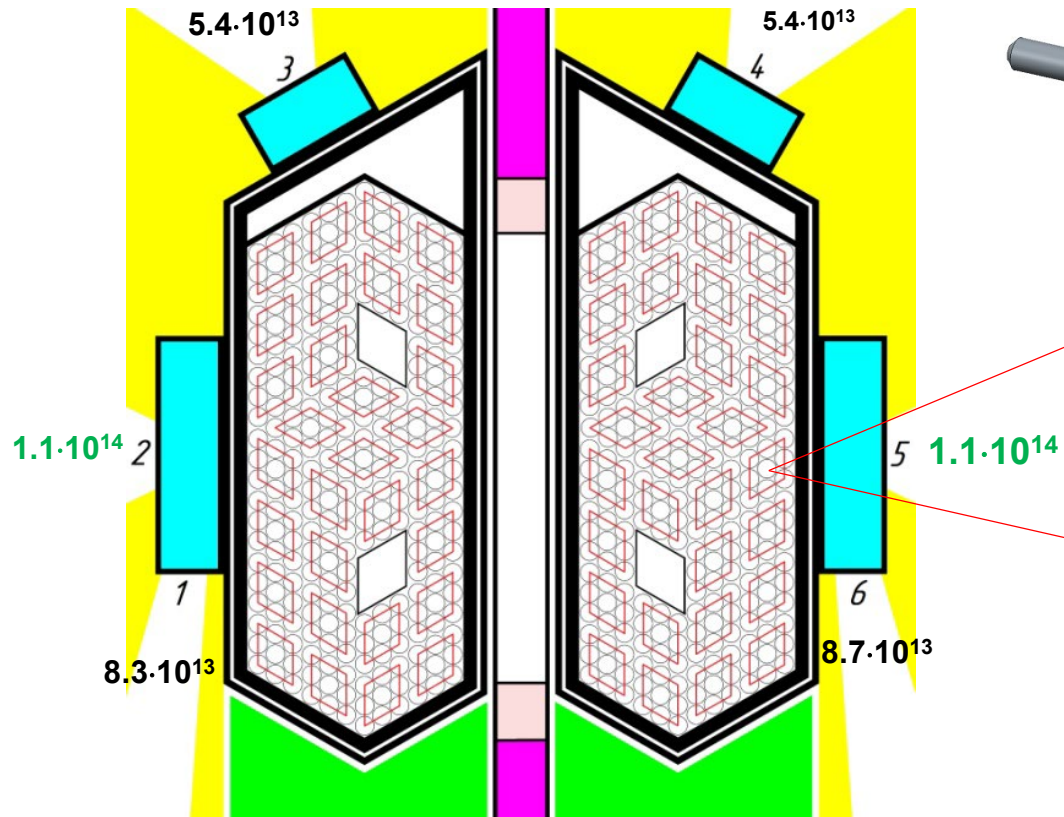
Fuel rod's diameter is 17x0.45 (thickness) mm

Variant 2



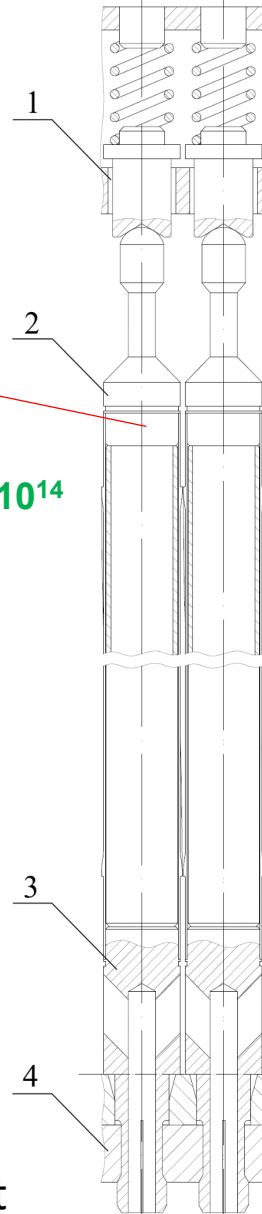
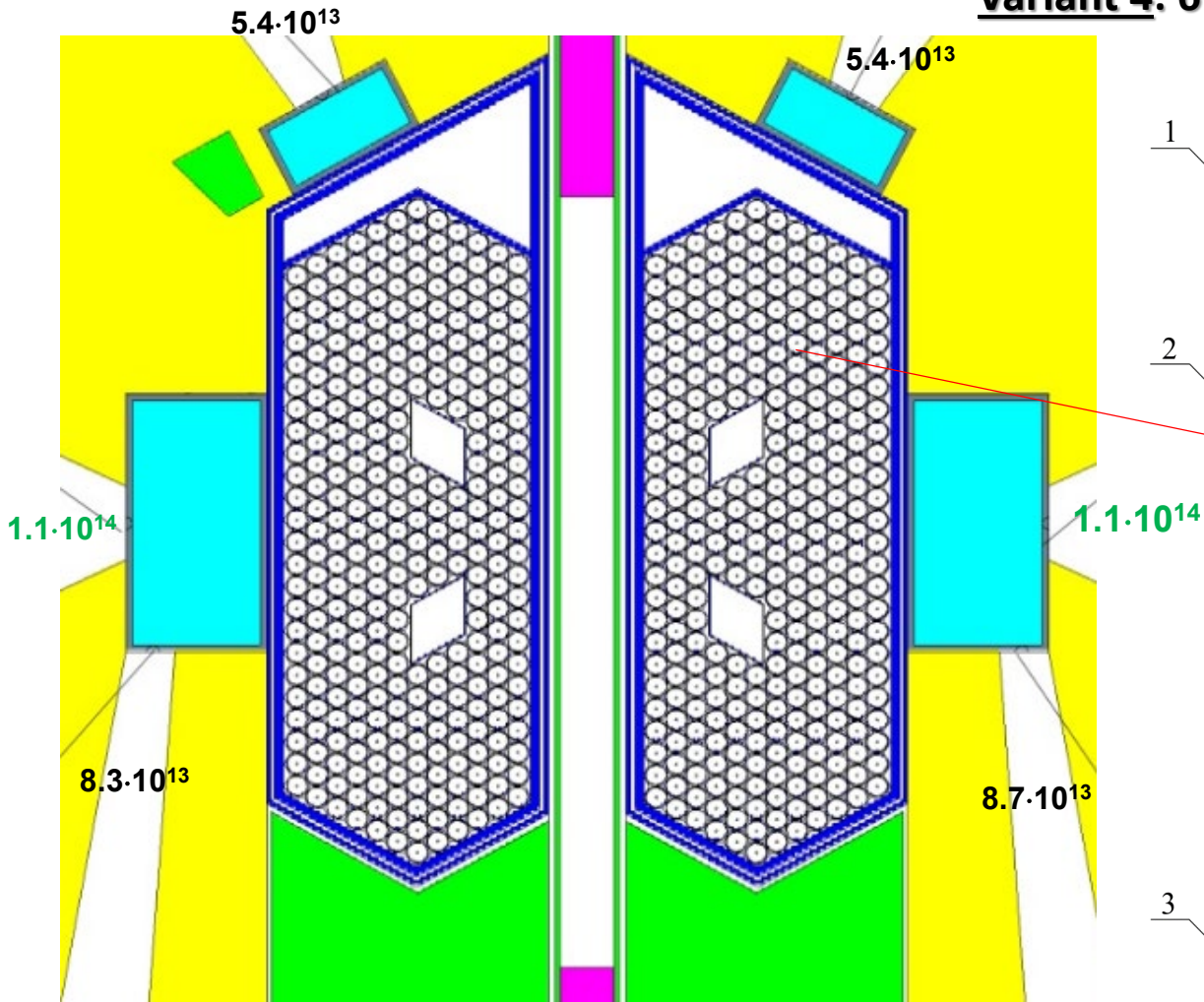
Техническое предложение реактора НЕПТУН (АО НИКИЭТ)

Variant 3: 60 RFA (540 fuel rods) without wrapper (external covering) tube



Техническое предложение реактора НЕПТУН (АО НИКИЭТ)

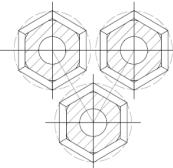
Variant 4: 612 fuel rods without wrapper (external covering) tube



Criteria	Variant 1 8 RFA	Variant 2 2 RFA	Variant 3 60 RFA without w.t.	Variant 4 612 f.r.
Flux, n/cm ² /c	1.07·10 ¹⁴	1.24·10 ¹⁴	1.10·10 ¹⁴	1.1·10 ¹⁴
Safety rules	++	---	+++	++
Fuel rods' charging	+	---	++	+++
Strength	+	+	-	++
Substantiation of RFA and f.r. construction	++	+	--	+++
Design for manufacturability of RFA	++	-	+	+++
Economic waste of containment failure of f.r. cover	+	---	++	+++
Power density of f.r.	+	-	++	++
Possibility of profiling of consumption	++	--	--	--
Design for manufacturability of over load	++	-	+	---
Possibility of calculations of reactor dynamic and instability	-- 14/2	- 2/15	++ 13/5	+++ 21/5
	1-2	4	3	1-2

Conclusion:

Sketch design project will keep one main variant of them and maybe it can include another one as reserved variant



Динамика реактора НЕПТУН

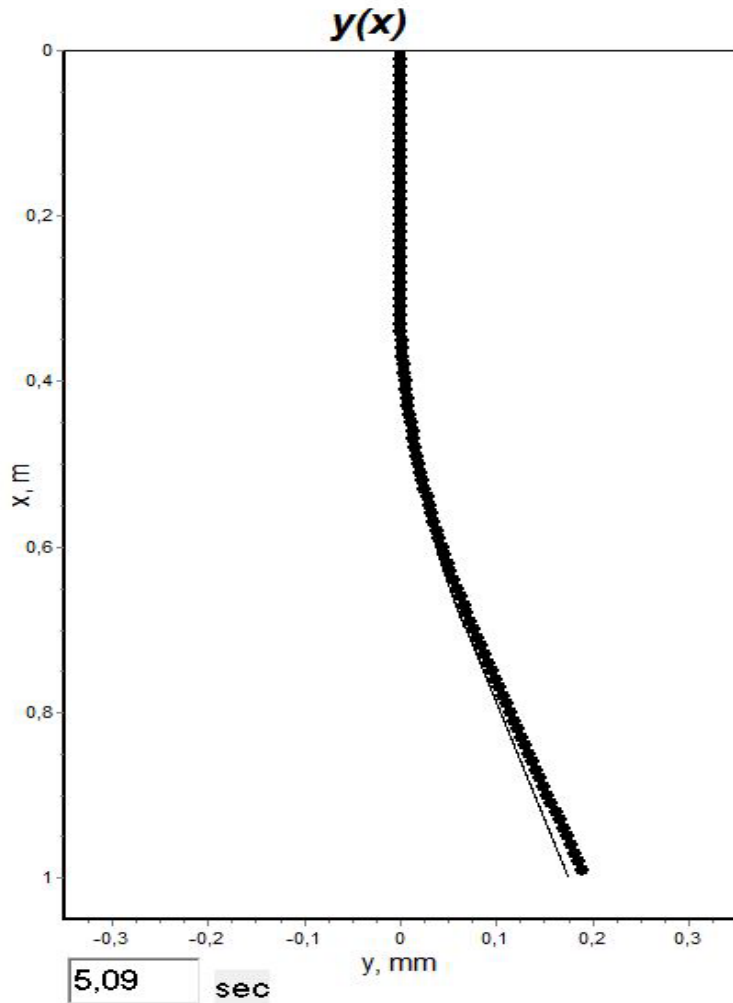


Fig. 1. The shape of the fuel rod in a state of static bending. The thin line is the solution of the static equation, the bold line is the numerical-analytical solution of the equation of motion at $t = 5$ sec

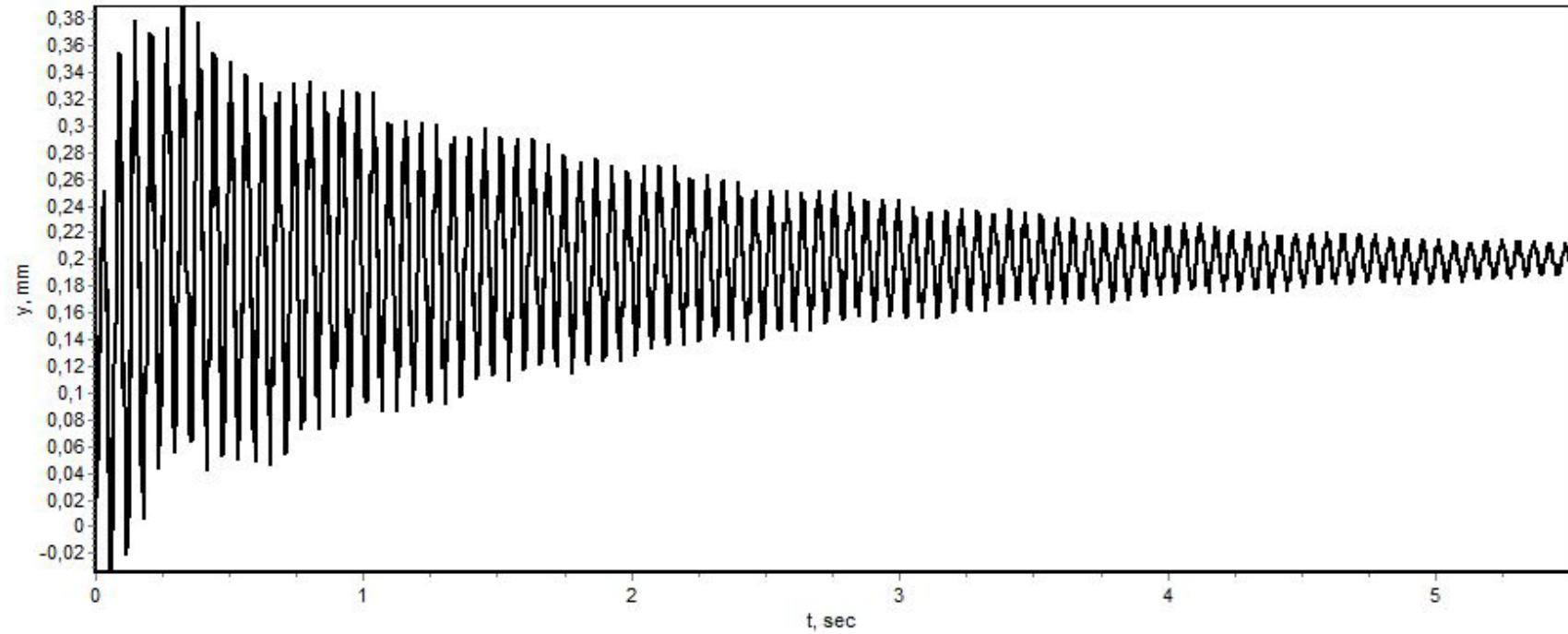


Fig. 2. Dynamics of the position of the free end of the rod after "turning on" the temperature

Динамика реактора НЕПТУН

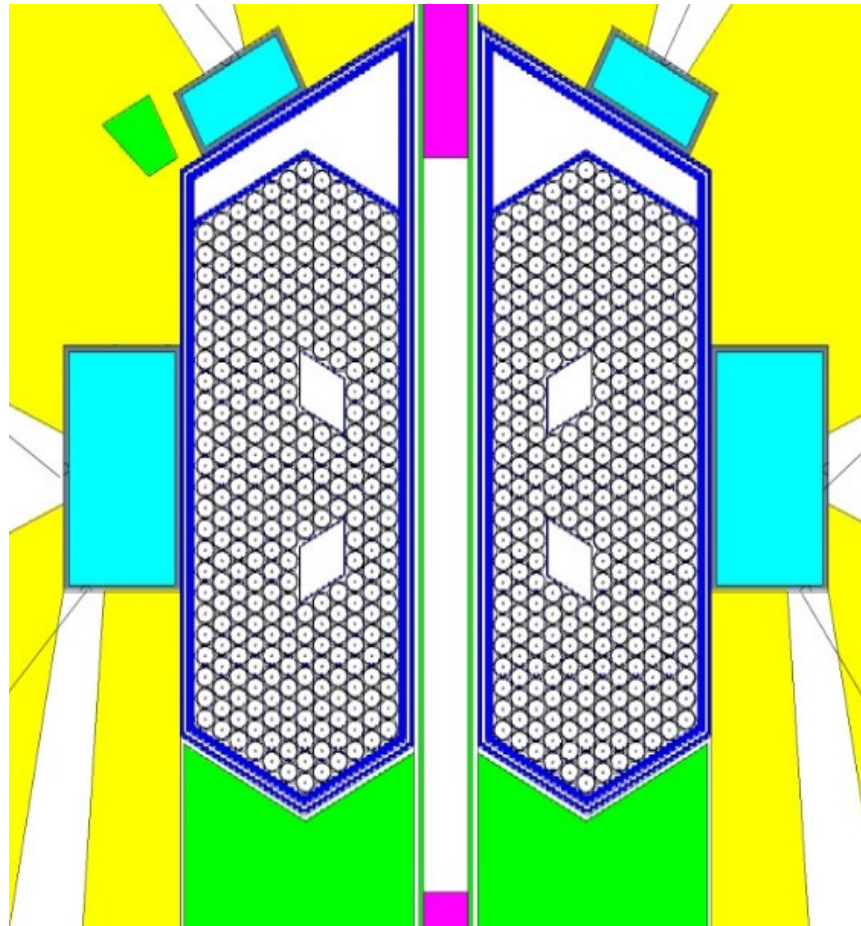
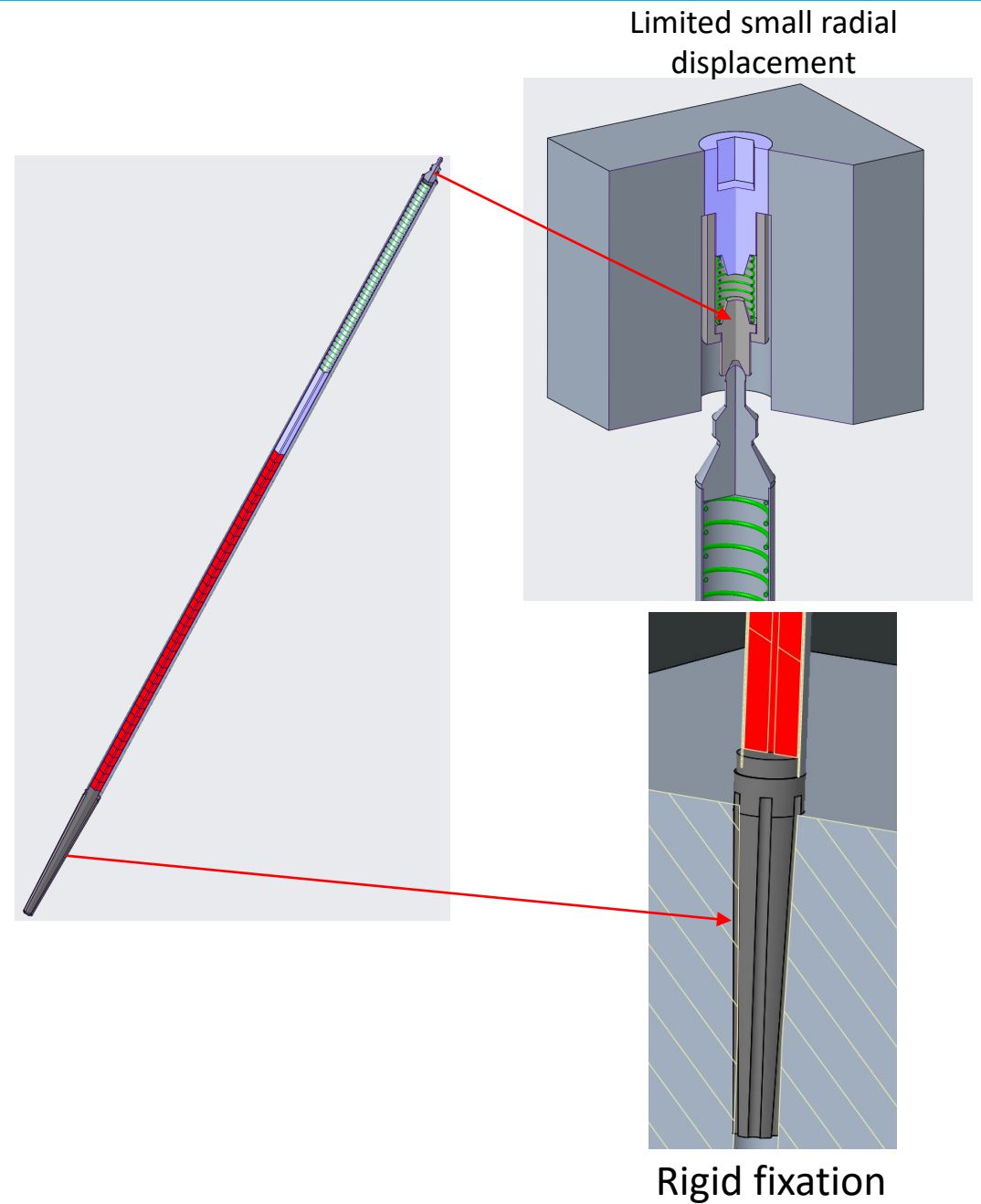
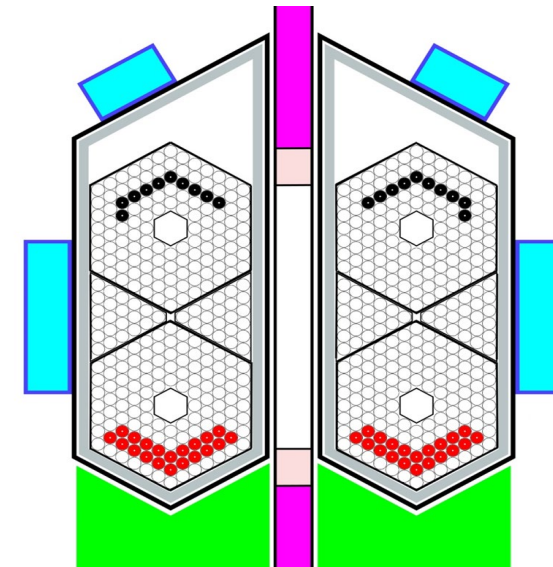
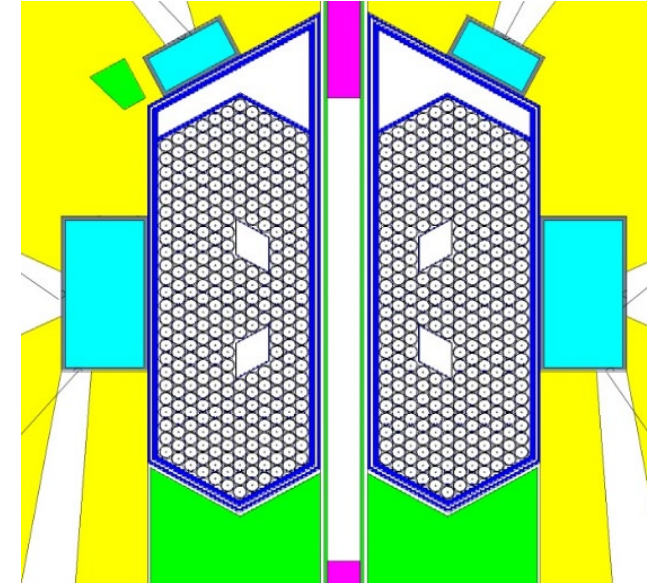


Fig. 3. Optimal design of fuel rods and the composition of the NEPTUN reactor active core



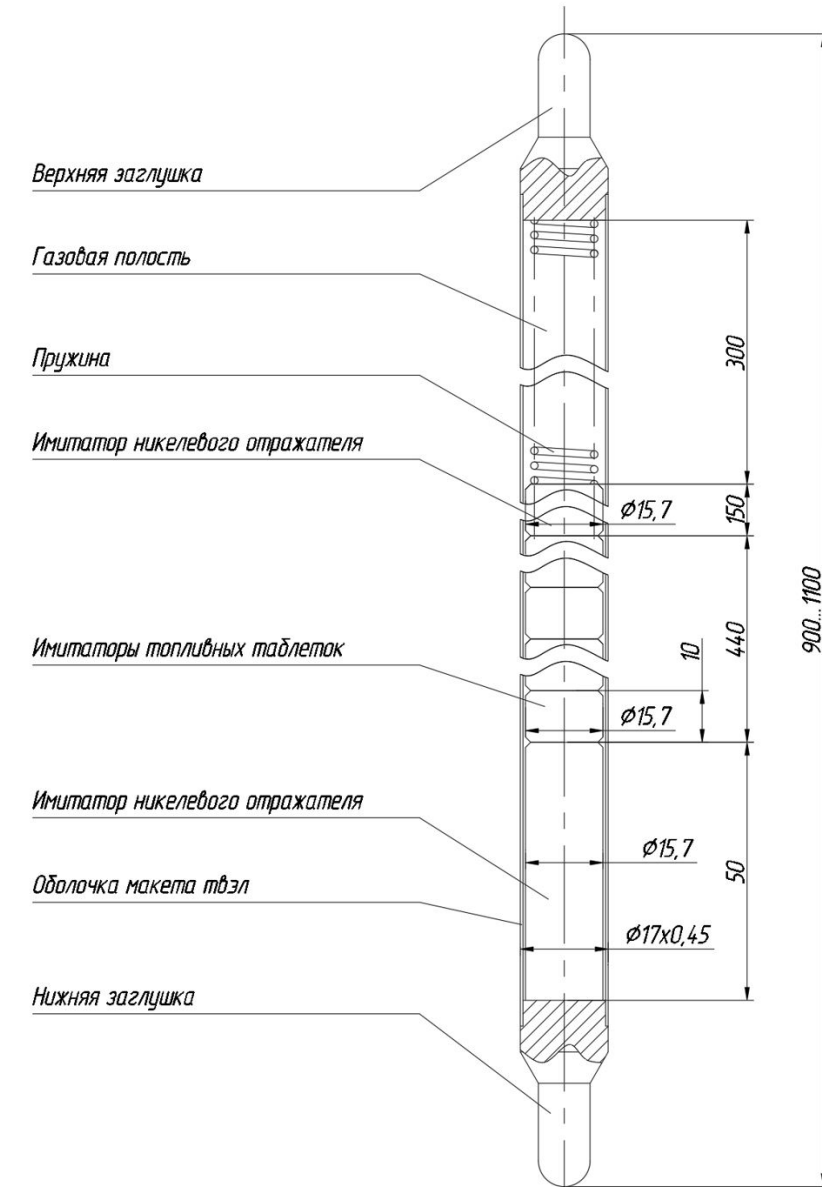
Предварительные оценки влияния шага решетки ТВЭЛ на параметры реактора НЕПТУН (ОИЯИ)

	Шаг ТВЭльной решётки а.з., мм				
	18	18,2	18,5	19	19,5
Диаметр ТВЭЛ, мм	17,2				
Толщина оболочки ТВЭЛ, мм	0,45				
Диаметр топливной втулки, мм	16				
Диаметр внутреннего отверстия топливной втулки, мм	2				
Высота слоя торцевого отражателя сверху и снизу, мм	14,5				
Высота топливной части, мм	40,5	43	46	52	58
Удельная энергонапряженность, кВт/г	3,27E-02	3,09E-02	2,89E-02	2,55E-02	2,29E-02
критическая масса, г	4,84E+05	5,15E+05	5,51E+05	6,22E+05	6,95E+05
К-эфф	1,00059	1,00268	1,00231	1,00167	1,00019
Время поколения мгновенных нейтронов, нс	9,925	10,2308	10,5875	11,0629	11,6438
Эффективность МР, %	7,49%	7,64%	7,95%	8,15%	8,58%
К-эфф, под крит,	0,930827	0,931333	0,928371	0,92605	0,921127
	ПШБН, н/см ² /с				
точка 1	2,069E+14	2,032E+14	1,965E+14	1,791E+14	1,688E+14
точка 2	1,383E+14	1,391E+14	1,337E+14	1,279E+14	1,139E+14
точка 3	9,516E+13	9,248E+13	8,728E+13	8,160E+13	7,526E+13
точка 4	6,496E+13	6,402E+13	6,190E+13	5,561E+13	5,263E+13
точка 5	9,363E+13	8,828E+13	8,442E+13	7,643E+13	7,171E+13



Предварительная программа работ по развитию и верификации математической модели динамики реактора НЕПТУН (для одиночного твэла)

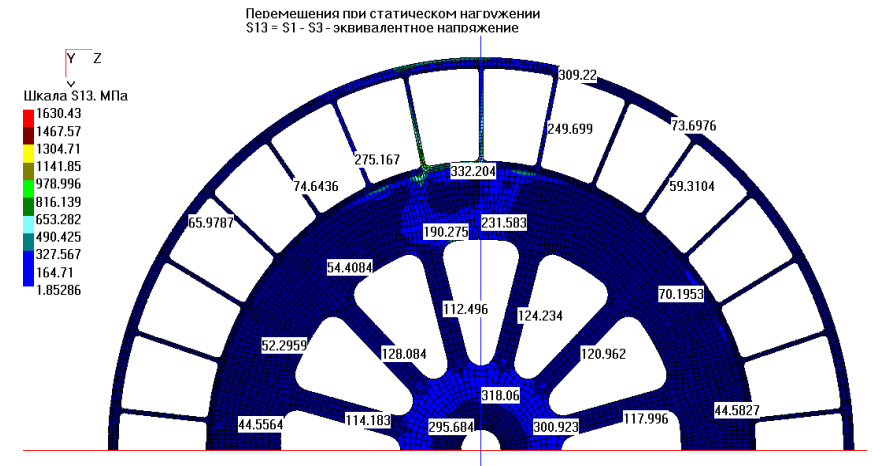
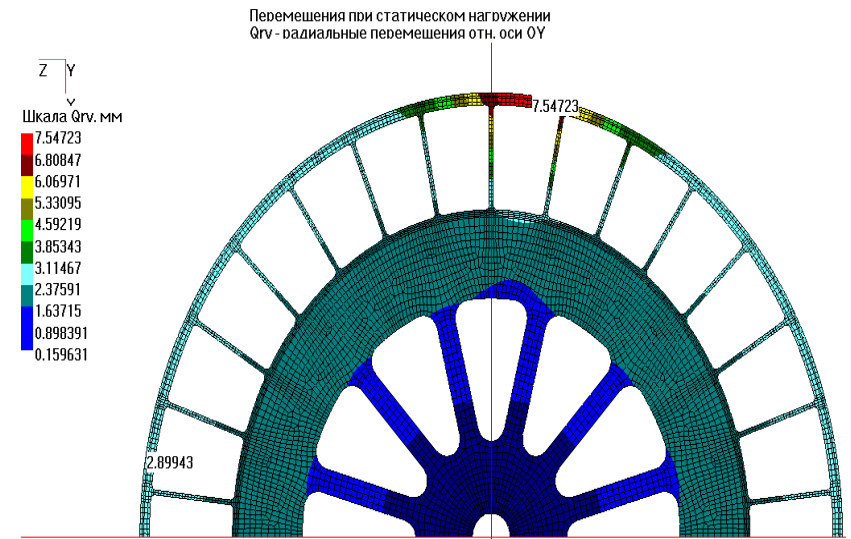
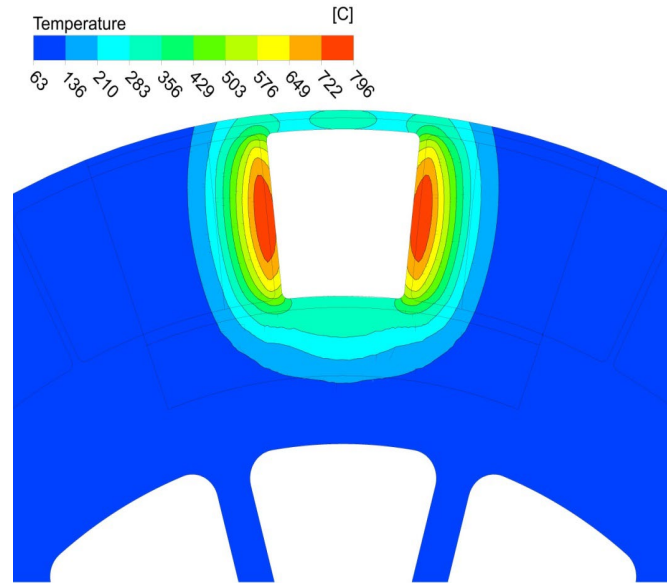
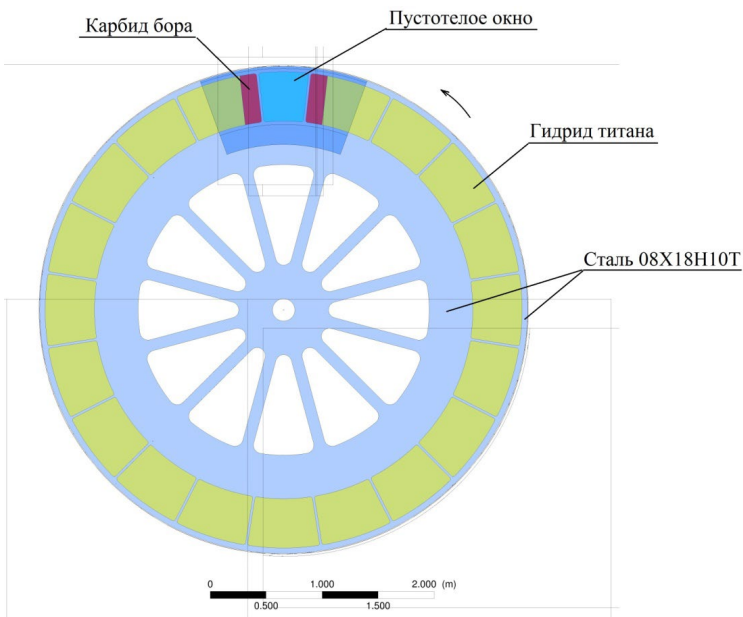
1. Изучение термомеханических процессов в модельных твэлах реактора НЕПТУН при воздействии одиночных импульсов энерговыделения и связанных с этим нейтронно-физических свойств реактора НЕПТУН на базе установок РФЯЦ – ВНИИТФ им. академ. Е.И. Забабахина
2. Виброакустические измерения параметров модельного твэла
3. Изучение термомеханических процессов в модельных твэлах при воздействии периодических импульсов энерговыделения
4. Гидродинамические измерения влияния среды теплоносителя на движение твэлов
5. Использование экспериментальных результатов для завершения создания математической модели динамики пульсирующего реактора



Оптимизация конструкции КР и МР реактора НЕПТУН (АО НИКИЭТ)

Основная цель оптимизации – расчетное обоснование конструктивных и технологических решений МР и КР НЕПТУН для выбора варианта конструкции, обеспечивающего работоспособность изделия во всех заданных условиях эксплуатации

Задачи – разработка конструкции КР, обладающего наименьшей тепловой нагруженностью и температурными деформациями для *потвзельного* варианта компоновки а.з., разработка МР в кожухе, нейтронно-физические расчеты



Заключение

- 1. Научная программа реактора НЕПТУН** определяет парк спектрометров. Парк спектрометров формирует требования к плотности потока нейтронов (высокопоточный реактор) и их энергии (тип замедлителя, ТН, ХН, ОХН, УХН)
- 2. Нептуний** как изотоп, имеющий пороговый характер сечения деления позволяет получить уникальные характеристики для проведения нейтронных исследований (высокая плотность потока, короткий импульс, низкий фон). Необходим НИОКР по созданию топлива
- 3. Разрабатывается модель динамики реактора НЕПТУН** для изучения его колебательной устойчивости. Расчеты динамики показывают, что реактор устойчив, если а.з. имеет потвэльную компоновку с «жестким» креплением твэлов. Расчеты колебательной устойчивости альтернативной классической компоновки в виде чехловых ТВС в настоящее время является трудновыполнимой задачей. Разрабатываемая модель динамики должна быть верифицирована, в т.ч. при помощи экспериментального уточнения основных параметров (например, величина изгиба)
- 4. В процессе оптимизации конструкции КР, МР, в т.ч. и типа компоновки а.з.** необходимо сохранить оптимальные нейтронно-физические характеристики реактора НЕПТУН (ППТН, крит. масса, мощность, коэффициент размножения (кэфф), высокая эффективность МР (кэфф между импульсами 0,95, в импульсе 1,00012: низкий фон, высокая пптн, короткий импульс)

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!

