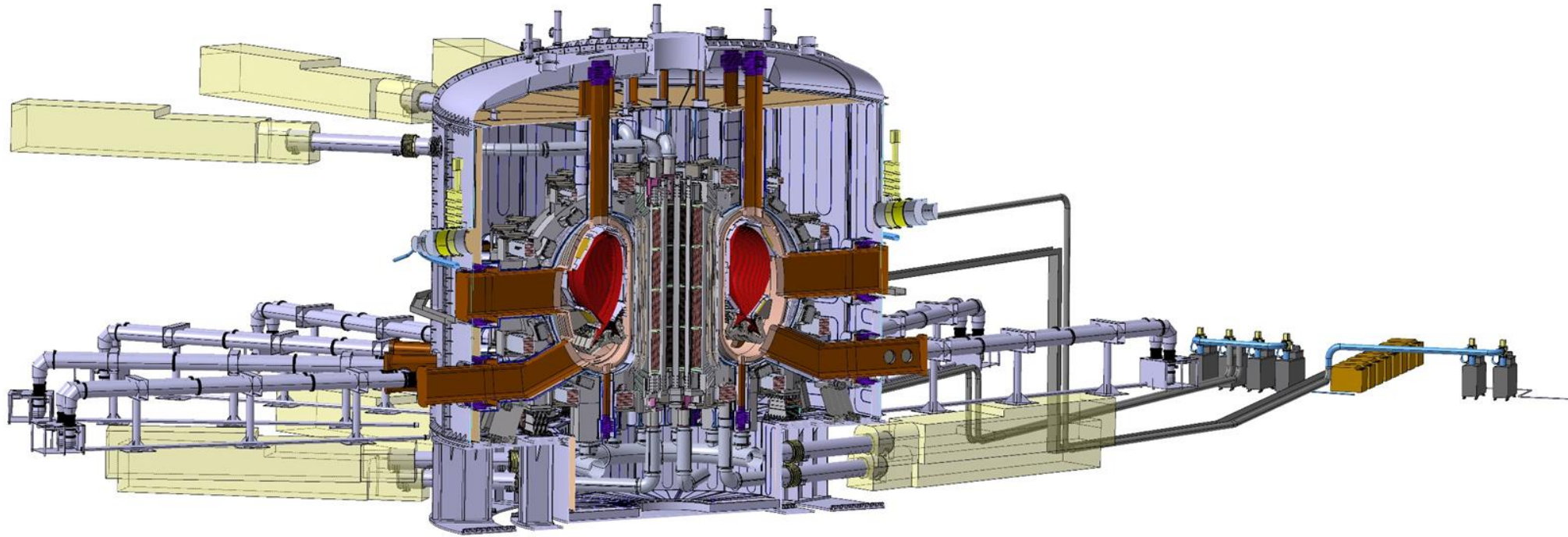




НИИЭФА  
РОСАТОМ



## *ТРТ: К вопросам о механической прочности обмотки тороидального поля и необходимости корректировки в конструкциях и компоновке КОП*

Открытый научный семинар «Управляемый термоядерный синтез и плазменные технологии»  
АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», г. Троицк, 01 марта 2023 года

**Родин Игорь Юрьевич**

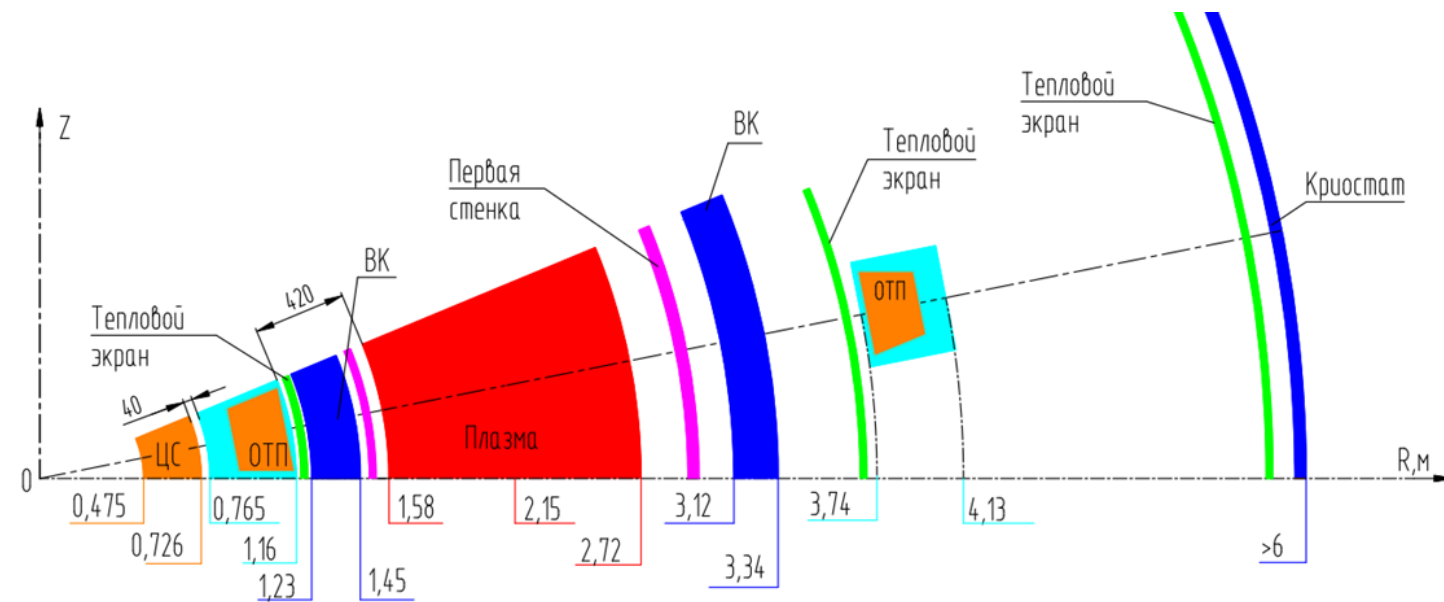
# Технические характеристики установки ТРТ-2022

(НИОКР «Создание эскизного проекта токамака с реакторными технологиями. Этап 2022 года» по государственному контракту № Н.4ф.241.09.22.1136 от 13 сентября 2022 г.)



НИИЭФА  
РОСАТОМ

## Раскладка по радиусу



ПАРАМЕТР	ЗНАЧЕНИЕ
Ток плазмы, $I_p$ , МА	5
Большой радиус плазмы, $R_0$ , м	2,15
Малый радиус плазмы, $a$ , м	0,57
Аспектное отношение, $R/a$	3,77
Вытянутость сечения $k_{95}/k_x$	1,8/1,95
Треугольность $\delta_{95}/\delta_x$	0,3 / 0,5
Тороидальное магнитное поле на радиусе $R_0$ $B_T$ , Тл	8 (10)
Гофрировка на внешней границе плазмы, %	0,35
Число катушек тороидального поля	16
Поле рассеяния в зоне начального формирования разряда, Гс	<20
Длительность разряда, $\Delta t_{\text{flattop}}$ , с	$\geq 100$
Мощность дополнительного нагрева плазмы $P_{\text{AUX}}/CD$ , МВт	$\leq 40$
Количество рабочих импульсов, не менее	20000

$N_{\text{ОТП}} = 16$ ,  $\delta_{\text{ripple}} \approx 0,35\%$ ,  $R_{\text{pl}} = 2,15\text{ м}$ ,  $a_{\text{pl}} = 0,57\text{ м}$ ,  $I_{\text{pl}} = 5\text{ МА}$ ,  $B_{t0} = 8\text{ Тл}$ ,  
 $B_{\text{отп.мах}} \approx 15,2\text{ Тл}$ ,  $B_{\text{ОИ.мах}} \approx 16,7\text{ Тл}$ ,  $j_{\text{ОИ.КОНСТР.}} \approx 55\text{ МА/м}^2$ ,  $\Delta\Psi = 34\text{ Вс}$ ,  
 $j_{\text{ОТП.КОНСТ.}} = 35,6\text{ МА/м}^2$ ,  $I_{\text{ОТП}} = 76,8\text{ кА}$ ,  $N_{\text{К.ОТП}} = 70\text{ витков}$ ,  $AW_{\text{К.ОТП}} = 5,376\text{ МА}$

Открытый научный семинар «Управляемый термоядерный синтез и плазменные технологии»,  
г. Троицк, 01 марта 2023 г., И.Ю. Родин

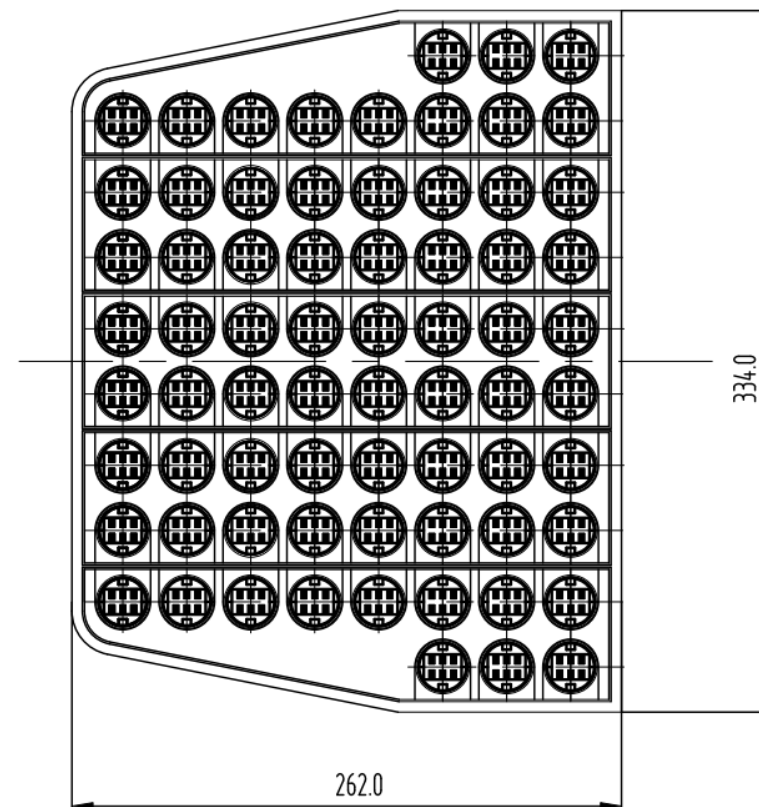
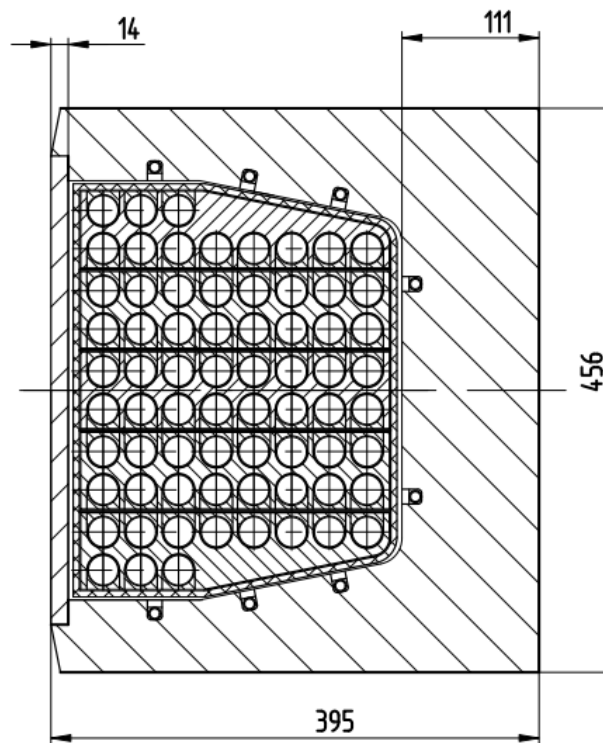
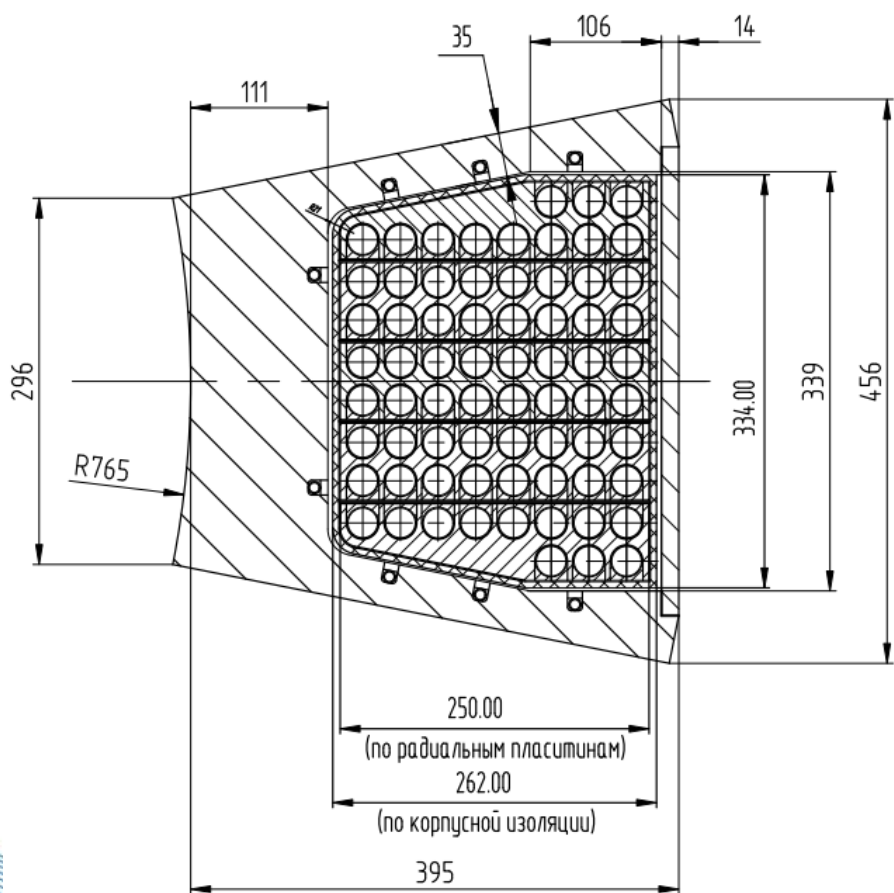
# Сечения катушки ОТП ТРТ-2022



НИИЭФА  
РОСАТОМ

Внутренняя нога

Внешняя нога



Открытый научный семинар «Управляемый термоядерный синтез и плазменные технологии»,  
г. Троицк, 01 марта 2023 г., И.Ю. Родин

## *К вопросу о механической прочности обмотки тороидального поля*



НИИЭФА  
РОСАТОМ

В качестве конструкционного материала корпуса ОТП рассматривается отечественная сталь 03Х20Н16АГ6 (пределы текучести 1200 МПа и прочности 1500 МПа при  $T = 4.2\text{K}$ ). Данная сталь характеризуется повышенным на 20% пределом текучести, по сравнению со сталью, примененной в ИТЭР для аналогичной конструкции.

Расчёт НДС и оценка прочности ЭМС ТРТ, выполненные в 2022 г., показали, что в корпусе обмотки тороидального магнитного поля и в радиальных пластинах механические напряжения, вызванные электромагнитными нагрузками, превышают допустимые значения - коэффициент запаса прочности (отношение допустимого напряжения к расчётному) для корпуса ОТП и радиальных пластин  $K = 0,88 < 1$  (должен быть  $\geq 1$ ). При этом зазоры - между ОИ и ОТП, между ОТП и ВК – недостаточны для размещения механической структуры и теплового экрана. В качестве решения — предлагается уменьшить толщину водяной защиты вакуумной камеры со 140 до 90 мм, что позволит:

- увеличить сечение ОТП — на 30 мм, обеспечив в требующуюся механическую прочность ОТП;
- увеличить зазоры между ОИ и ОТП — с 39 до 49 мм, а между ОТП и ВК — с 70 до 80 мм.

# Некоторые данные современных проектов токамаков с DD плазмой, длинным импульсом и специальной защитой от нейтронов



НИИЭФА  
РОСАТОМ

В таблице приведены некоторые проектные данные установок ТРТ, JT-60SA и DTT. Во всех указанных установках используется сверхпроводниковая магнитная система (NbTi в JT-60SA, Nb<sub>3</sub>Sn – в DTT, ВТСП (REBCO) – в ТРТ), все рассчитываются на длительное горение плазмы (более 100 с).

Установка	R <sub>0</sub> , м	B <sub>t0</sub> , Тл	I <sub>p</sub> , МА	Интенсивность DD нейтронов, 10 <sup>18</sup> н/с	Мощность в нейтронах, кВт	Зазор PL-TF, мм	Толщина защиты, мм
JT-60SA	3,00	2,7	5,5	0,4	184*	410	188
DTT	2,11	6	5,5	0,15	60	290	120
ТРТ-2022	2,15	8	5	1	400	420	220

\* Мощность в нейтронах приведена с учётом нейтронов от рождающегося при DD реакции трития (мощность без учёта вклада трития ~ 160 кВт).

Видно, что в проекте ТРТ существенно выше – как тороидальное поле, так и ожидаемая интенсивность нейтронного излучения из плазмы. Более того, в ТРТ кроме DD режима предполагаются также режимы горения плазмы дейтерия с добавкой трития и равнокомпонентной DT плазмой.

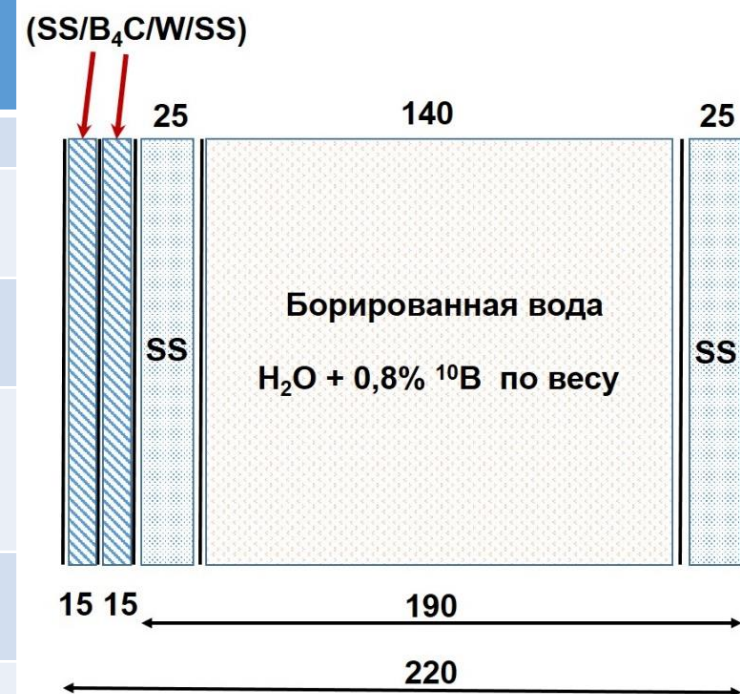
# О возможности уменьшения толщины вакуумной камеры (ВК) с дополнительной защитой (1/2)



НИИЭФА  
РОСАТОМ

Толщина и состав защиты в JT-60SA, DTT и TPT-2022

	JT-60SA	DTT	TPT
Первая оболочка ВК	SS 316L 24 мм	SS 15 мм	SS 25 мм
Пространство между оболочками	Борированная вода, 140 мм	Борированная вода, 65 мм Композиция SS/B <sub>4</sub> C/W/B <sub>4</sub> C/SS, 2,5 см (внутри ВК)	Борированная вода, 140 мм Композиция 2×(SS/B <sub>4</sub> C/W/SS), 3 см (вне ВК)
Доп. защита ВК	-		
Вторая оболочка ВК	SS 316L 24 мм	SS 15 мм	SS 25 мм
Суммарная толщина	188 мм	120 мм	220 мм



В TPT-2022 суммарная толщина защиты 220 мм,  
толщина двухоболочечной ВК - 190 мм.

## О возможности уменьшения толщины вакуумной камеры (ВК) с дополнительной защитой (2/2)



НИИЭФА  
РОСАТОМ

Проведены **нейтронно-физические** расчёты [1, 2] в геометрии ТРТ-2022, при учёте как защитных свойств двухбололочечной ВК, так и дополнительной защиты (2 слоя SS/B<sub>4</sub>C/W/SS) и стального корпуса ОТП.

Результаты по величине мощности тепловыделения первых слоёв проводника ОТП:

- нейтроны **DD** реакции, интенсивность источника  $10^{18}$  н/с → тепловыделение < **3 мВт/см<sup>3</sup>**;
- нейтроны **DT** реакции, интенсивность источника  $10^{18}$  н/с → тепловыделение **30 мВт/см<sup>3</sup>**.

Такое резкое отличие (**10 раз**) связано с большей энергией нейтронов DT реакции (14 МэВ (DT) ↔ 2,45 МэВ (DD)) и вкладом в тепловыделение от фотонов (в случае DT нейтронов).

Кроме того, в [1, 2] отмечено, что уменьшение толщины слоя борированной воды на **50 мм** увеличивает нагрев проводника ОТП в **1,8 раза**. Это позволяет, снизив интенсивность источника нейтронов до  $0,5 \times 10^{18}$  н/с «сэкономить» 40 - 50 мм и «отдать» их другим подсистемам.

[1] Д. В. Портнов, Ю. Г. Высоких, Ю. А. Кащук, Р. Н. Родионов. Токамак с реакторными технологиями (TRT): предварительный анализ ядерного энерговыделения в катушках тороидального поля. Физика плазмы, 2021, Т. 47, № 12, С. 1170.

[2] Д. В. Портнов, Ю. Г. Высоких, Ю. А. Кащук, Р. Н. Родионов. Предварительный анализ ядерно-радиационного разогрева обмоток тороидального поля ТРТ. Отчёт. М. 2021.

Открытый научный семинар «Управляемый термоядерный синтез и плазменные технологии», г. Троицк, 01 марта 2023 г., И.Ю. Родин

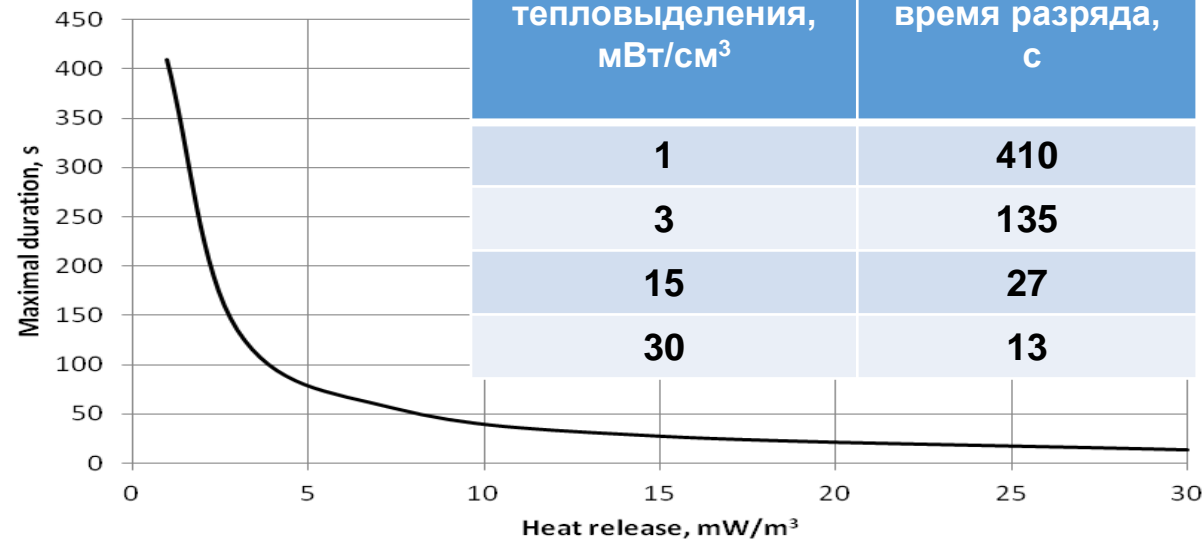
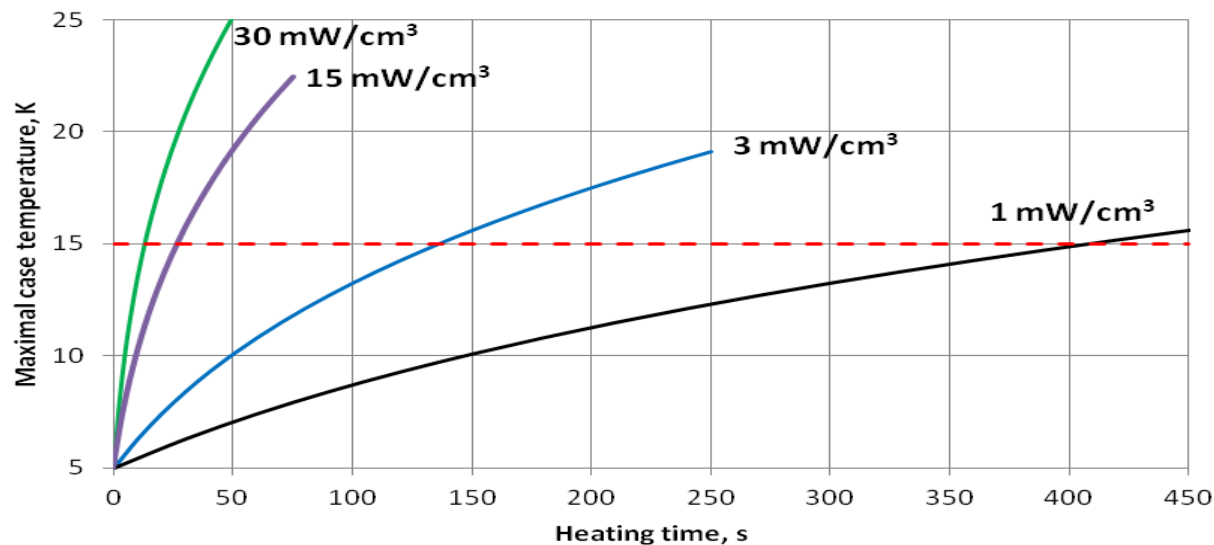
# Влияние объёмного нейтронного тепловыделения на допустимое время горения плазмы



НИИЭФА  
РОСАТОМ

Ограничение по допустимой температуре обмотки ОТП: **15 К**\*

\*(см. «Расчёт предварительных параметров охлаждения и температурного состояния ЭМС для основных режимов работы». Расчет тепловой. 1А.521.337 РР5, 2022 г.)



Радиационный разогрев ОТП в зависимости от длительности разряда и объёмного тепловыделения в материале ОТП

Длительность разряда в зависимости от плотности объёмного радиационного тепловыделения в ОТП

Из приведённых графиков видно, что только при значениях тепловыделения в материале ОТП (нейтроны + фотоны) меньших **3 мВт/см<sup>3</sup>** гарантируется длительность разряда не менее 100 секунд.

Открытый научный семинар «Управляемый термоядерный синтез и плазменные технологии»,  
г. Троицк, 01 марта 2023 г., И.Ю. Родин



# О допустимом уровне трития в плазме TPT (1/2)



НИИЭФА  
РОСАТОМ

В проектах токамаков **DTT** и **JT-60SA** плазма чисто **дейтериевая**.

Оценки показывают, что основной вклад в генерацию нейтронов дают реакции **пучок – плазма**. Доля реакций в самой термализованной плазме существенно меньше.

Мощность пучков отрицательных ионов, дающих вклад в генерацию нейтронов, в проектах токамаков DTT и JT-60SA невелика:

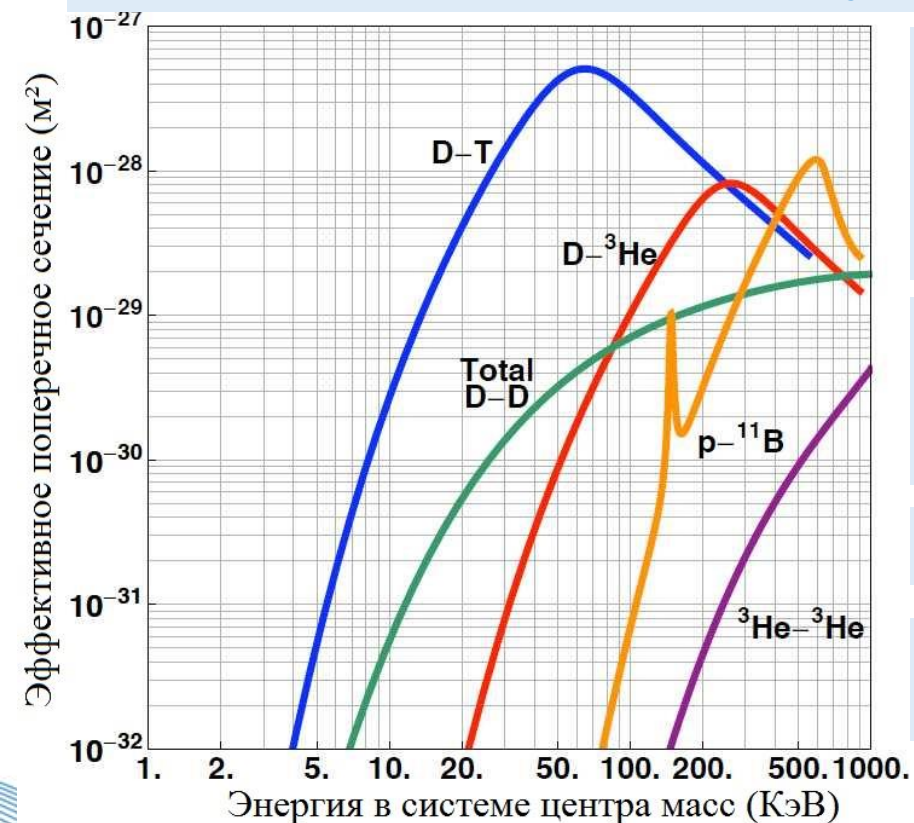
- $P_{N-NB} \sim 7,5$  МВт из суммарной мощности **45** МВт (**DTT**);
- $P_{N-NB} \sim 10$  МВт из суммарной мощности **41** МВт (**JT-60SA**).

Проект TPT отличается от DTT и JT-60SA тем, что мощность пучков отрицательных ионов близка к суммарной вводимой мощности:

$$P_{N-NB,TPT} \sim 30 - 40 \text{ МВт.}$$

В TPT энергия пучков отрицательных ионов (D)  $\sim 500$  кэВ.

При оценках можно принять, что в TPT реакции дейтериевого пучка на малой добавке трития пропорциональны вводимой мощности.



В диапазоне энергий 200-500 кэВ отличие сечений реакций (DT) и (DD) всего в несколько раз.

Открытый научный семинар «Управляемый термоядерный синтез и плазменные технологии»,  
г. Троицк, 01 марта 2023 г., И.Ю. Родин

## О допустимом уровне трития в плазме ТРТ (2/2)



НИИЭФА  
РОСАТОМ

### При оценках принято, что:

- в диапазоне энергий пучка 200 – 500 кэВ сечения реакций (DT) и (DD) отличаются в 5 раз;
- величины тепловыделений в ОТП для (DT) и (DD) нейтронов отличаются в 10 раз.

Тогда добавка в дейтериевую плазму 1 % трития приводит к росту генерации нейтронов на 5 %, а нагрева ОТП – на 50 %. Соответственно, добавка **2 %** трития **удваивает** нагрев ОТП.

Однако, поскольку базовый уровень генерации нейтронов в варианте с уменьшенной на 40 – 50 мм толщиной слоя борированной воды принят на **уменьшенном вдвое** уровне ( $0,5 \times 10^{18}$  н/с), то добавка 2 % трития в этом случае приводит к уровню нагрева ОТП ~ 6 мВт/см<sup>3</sup> и допускаемой длительности разряда ~ **60 - 70** с.

Дальнейший рост содержания трития требует ещё большего уменьшения длительности или снижения уровня нейтронной генерации ( $< 0,5 \cdot 10^{18}$  н/с) при уменьшении  $P_{N-NB}$ .

**Важно уточнение этих оценок более точными расчётами поглощения пучков и генерации нейтронов. Соответствующие программы в России имеются.**

# Предложения по компромиссу между подсистемами

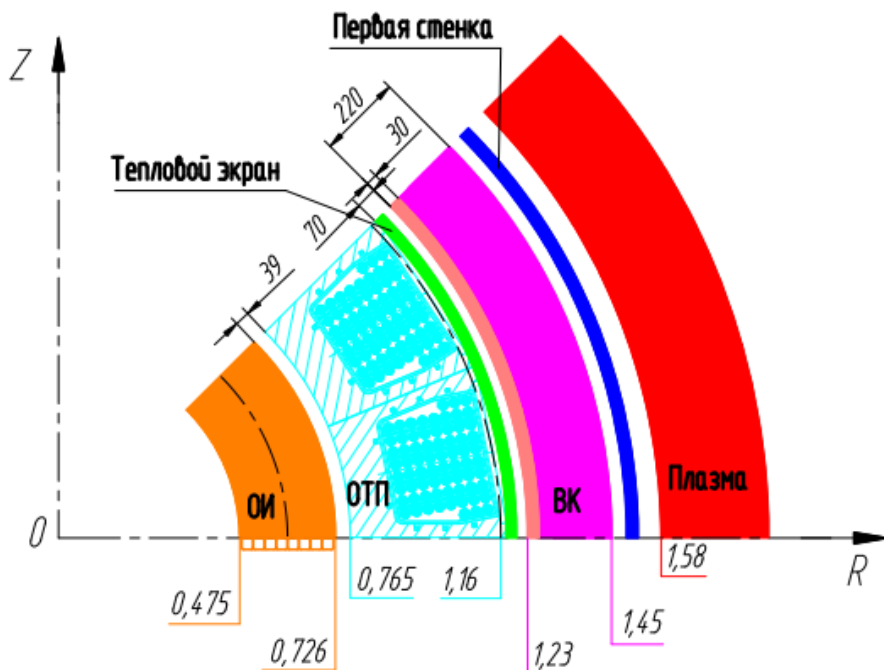


НИИЭФА  
РОСАТОМ

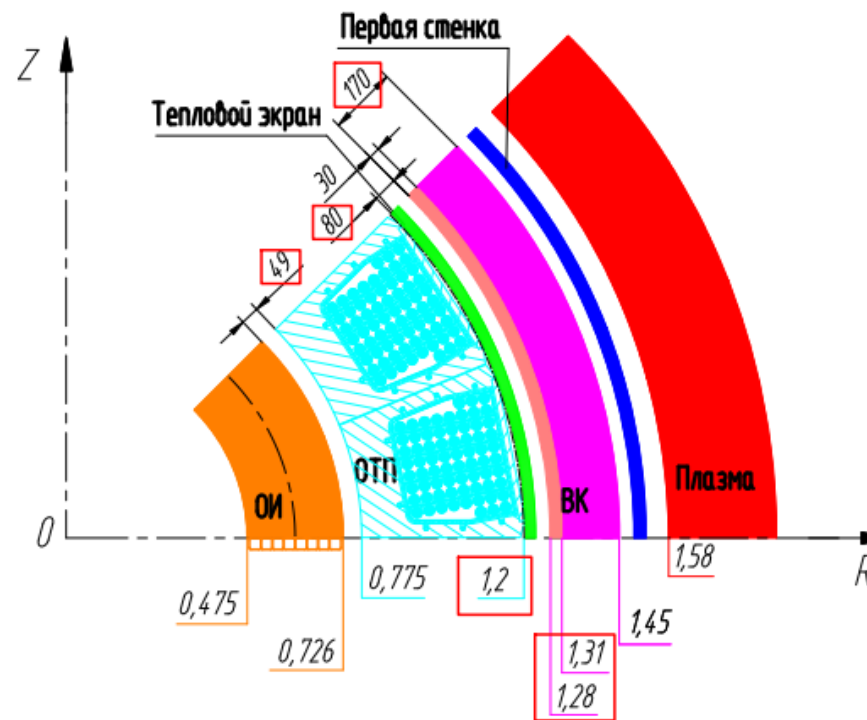
Предложения по следующей итерации параметров подсистем ТРТ по отношению к текущей версии сводятся к следующему:

- уменьшить слой борированной воды между оболочками ВК на 50 мм;
- увеличить зазор между ЦС и ОТП на 10 мм;
- увеличить толщину ОТП на 30 мм;
- увеличить зазор между ОТП и вакуумной камерой на 10 мм.

Раскладка по радиусу ТРТ-2022г (отчёт)



Раскладка по радиусу ТРТ-2023г (26.02.23)V5



Предлагаемая раскладка по радиусу приведена на рисунке (справа)

Открытый научный семинар «Управляемый термоядерный синтез и плазменные технологии», г. Троицк, 01 марта 2023 г., И.Ю. Родин

# О необходимости увеличения ширины SOL в TPT



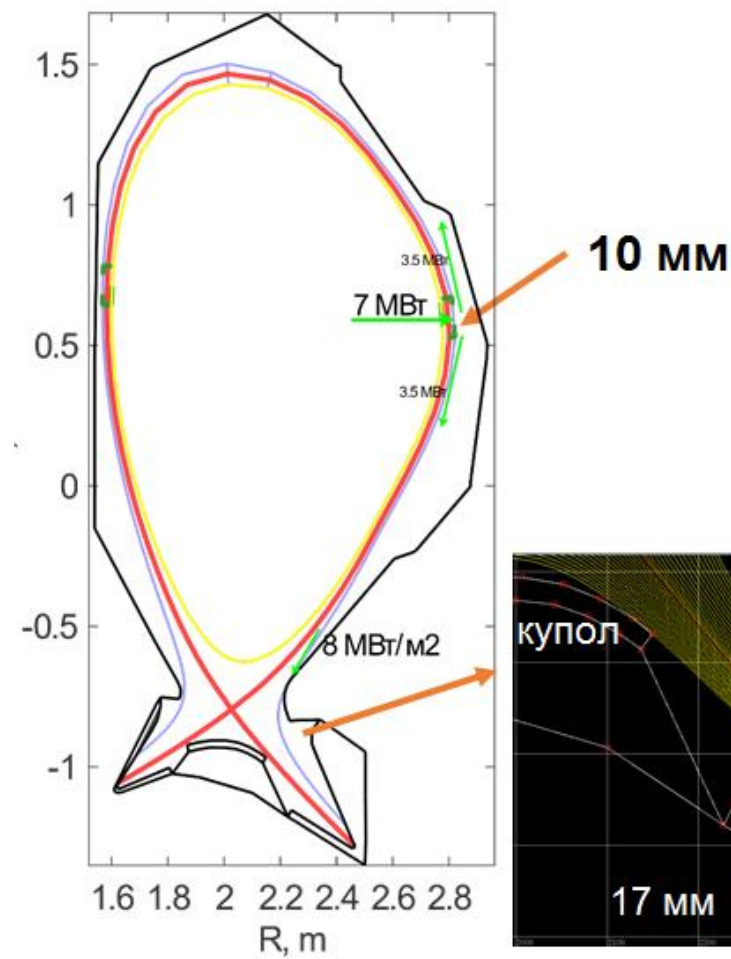
НИИЭФА  
РОСАТОМ

Специалисты СПбПУ (коллектив, возглавляемый В.А. Рожанским) - по итогам моделирования пристеночной плазмы для имеющегося базового сценария разряда и актуального профиля обращённой к плазме поверхности - выявили несколько моментов требующих внесения изменений в конструкцию:

В геометрии камеры TPT 2022 года расстояние от сепаратрисы до последней магнитной поверхности, касающейся поверхности слишком мало – **10 мм**. Во всех современных токамаках данное расстояние составляет не менее **50 мм**.

На внешний баффл может идти плотность потока энергии  $q = 8 \text{ МВт/м}^2$ , что приведёт к избыточному загрязнению плазмы.

Расстояние от сепаратрисы до магнитной поверхности, касающейся купола дивертора мало (**17 мм**). Необходимо увеличить расстояние до **50 мм**.



Открытый научный семинар «Управляемый термоядерный синтез и плазменные технологии»,  
г. Троицк, 01 марта 2023 г., И.Ю. Родин

## Значение зазора плазма-стенка для разных токамаков



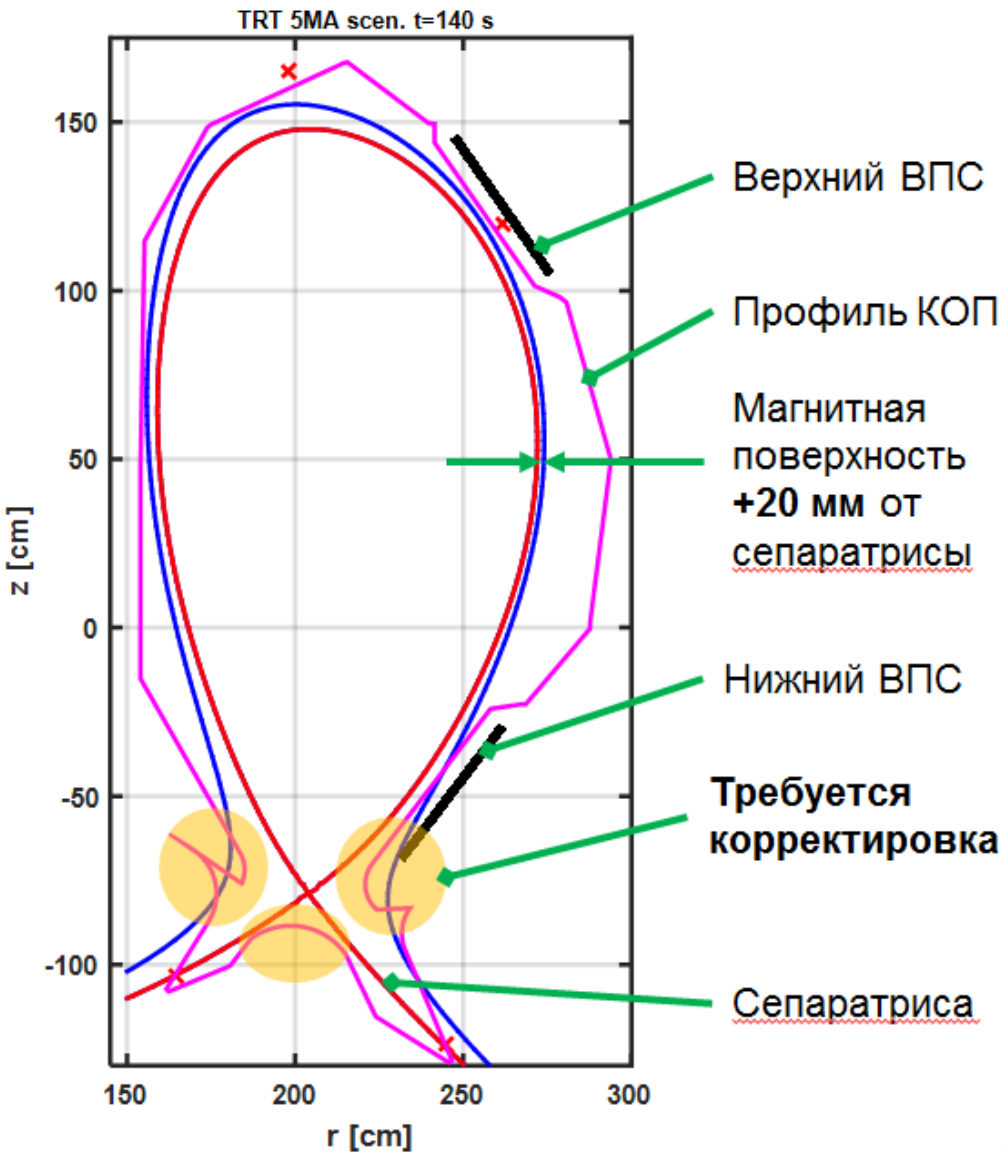
Установка	$R_0, \text{ м}$	$B_{t0}, \text{ м}$	$I_p, \text{ МА}$	Номер разряда	Расстояние между сепаратрисой и последней магнитной поверхностью, мм
JET	3	2,67	2,5	85278	45
JET*	3	2,65	2,46	96139	27
ASDEX Upgrade	1,65	2,5	0,8	28903	43
ITER	6,2	5,3	15	Baseline IMAS#123063	90
TPT-2022	2,15	8	5	-	10

\*разряд с высокой треугольностью; в центре разряда зафиксировано накопление примеси, распыленной со стенки камеры.

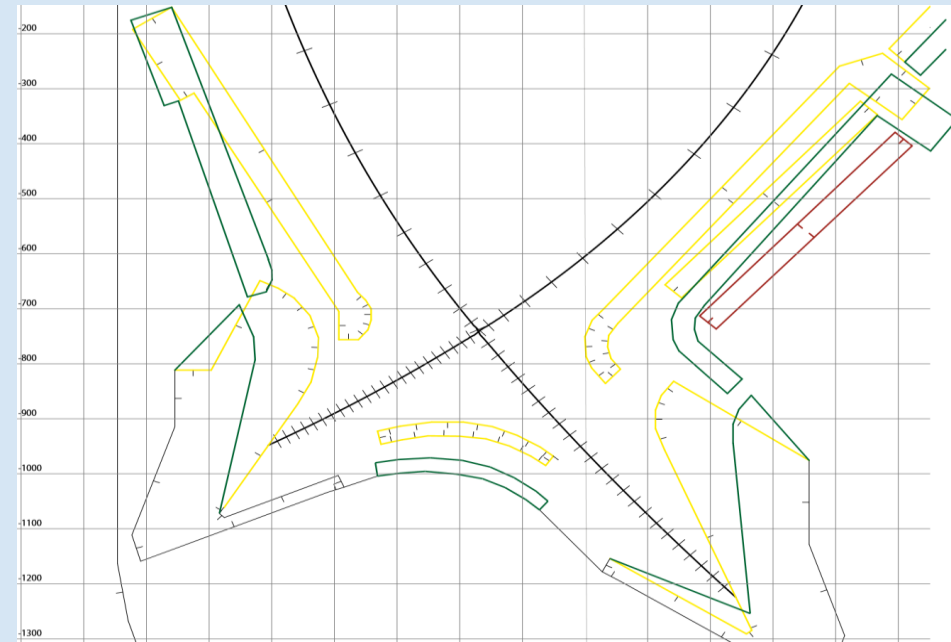
# Необходимые корректировки в конструкциях и компоновке КОП (1/2)



НИИЭФА  
РОСАТОМ



Для актуальных на текущий момент сценария разряда и профиля обращенной к плазме поверхности есть возможность обеспечить зазор плазма-стенка ~ 20 мм.



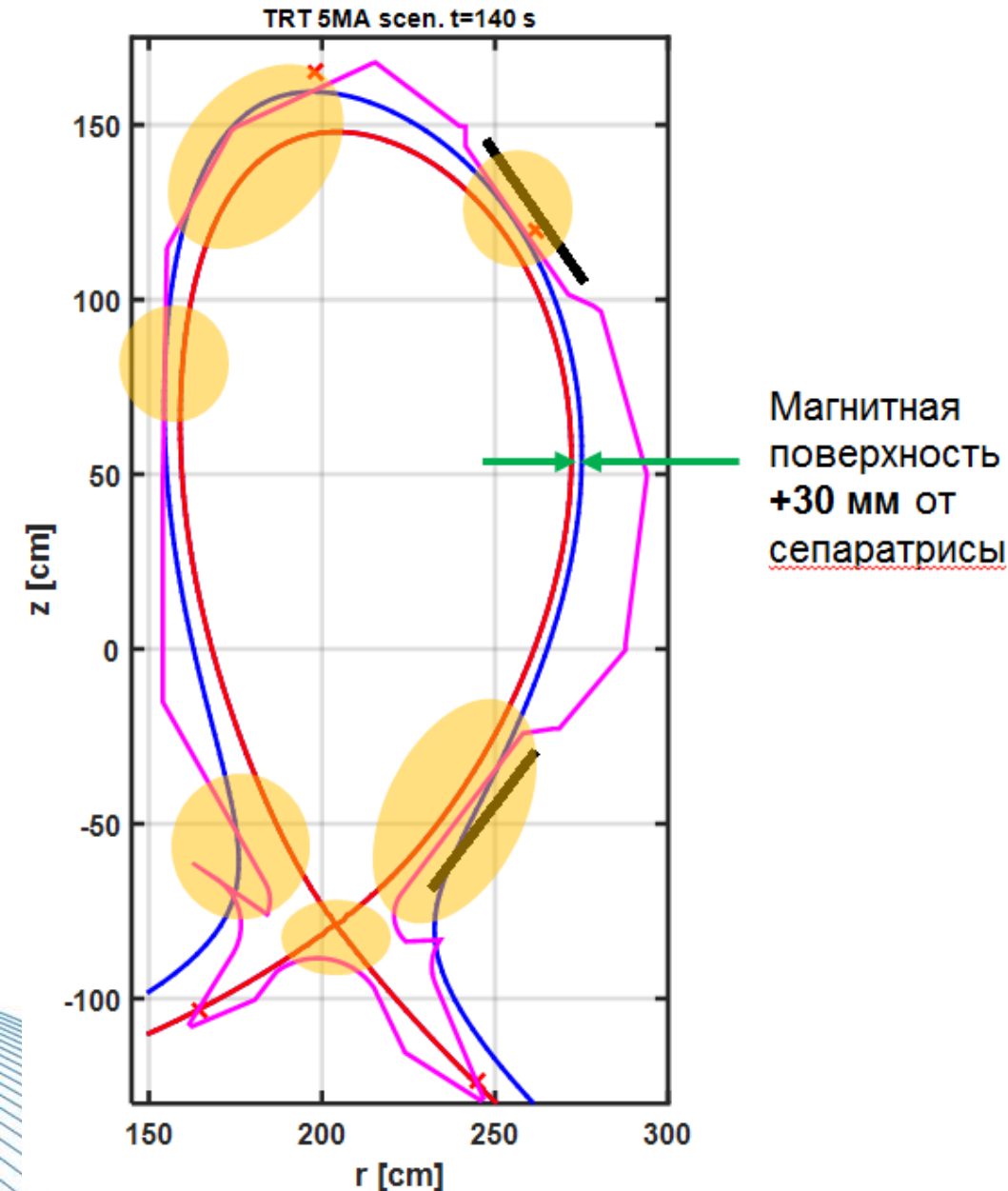
С этой целью в НИИЭФА при поддержке СПбПУ исследуются возможности корректировке положения баффлов, нижнего ВПС, а также мишеней дивертора. Работы планируются к выполнению в рамках НИОКР на эскизное проектирование ТРТ в 2023-2024 гг.

Открытый научный семинар «Управляемый термоядерный синтез и плазменные технологии»,  
г. Троицк, 01 марта 2023 г., И.Ю. Родин

# Необходимые корректировки в конструкциях и компоновке КОП (2/2)



НИИЭФА  
РОСАТОМ



Дальнейшее увеличение зазора плазма-стенка (50 мм согласно данным СПбПУ) без увеличения размеров токамака, либо снижения параметров плазмы – возможным не представляется.

Дальнейшее развитие проекта представляется возможным по одному из следующих вариантов:

1. Изменение исходных параметров проекта ТРТ (увеличение размеров установки, либо уменьшение объёма плазмы) с последующей корректировкой наработанных материалов проекта.
2. Независимо от принятых для ТРТ размеров установки и параметров плазмы выполняется поиск дополнительных альтернативных (менее энергонагруженных) режимов работы установки с пониженными параметрами (например  $I_p = 4$  МА), которые могут стать основными на этапе эксплуатации установки.

Открытый научный семинар «Управляемый термоядерный синтез и плазменные технологии»,  
г. Троицк, 01 марта 2023 г., И.Ю. Родин



НИИЭФА  
РОСАТОМ

# Спасибо за внимание!

Открытый научный семинар «Управляемый  
термоядерный синтез и плазменные технологии»,  
г. Троицк, 01 марта 2023 г., И.Ю. Родин