

МЕЖДУНАРОДНЫЙ ПРОЕКТ ИТЭР

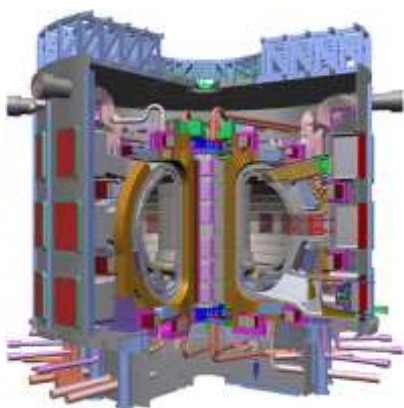


Рис. 1. Установка ИТЭР

НИКИЭТ более 30 лет принимает активное участие в программах по освоению управляемого термоядерного синтеза: участие в проектах Т-20, ГТРТ, ОПТЭС, ОТР, ИНТОР, ИТЭР и ДЕМО. Основным направлением деятельности НИКИЭТ является разработка ядерно-физических систем термоядерных установок, которые включают blanket, системы преобразования энергии, экспериментальные модули. Специалисты НИКИЭТ осуществляют комплексную разработку конструкций указанных систем, проводят экспериментально-исследовательские и опытно-конструкторские работы, привлекают к сотрудничеству другие предприятия ядерной отрасли России.

Наиболее значимым вкладом НИКИЭТ в освоение управляемого термоядерного синтеза является участие (совместно с АО «НИИЭФА», РНЦ «КИ» и АО «ВНИИНМ») в разработке международного термоядерного экспериментального реактора (ИТЭР), который сооружается во Франции. В проекте ИТЭР (рис. 1) принимают участие Европейский Союз, Республика Индия, КНР, Республика Корея, Российская Федерация, США и Япония. Следует отметить разработку проекта демонстрационного термоядерного реактора (ДЕМО) как прототипа будущих термоядерных электростанций, а также экспериментальных бридинговых модулей ДЕМО, предназначенных для испытаний в ИТЭР.

Подробнее о проекте ИТЭР

В 2009 году создано Частное учреждение Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом» «Проектный центр ИТЭР» являющееся

ответственным за вклад в натуральной форме Российской Федерации в проект ИТЭР.

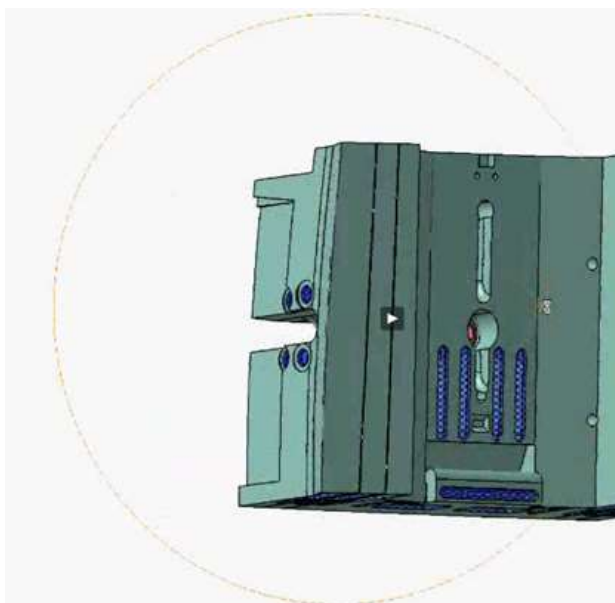
Применительно к ядерно-физическим системам ИТЭР АО «НИКИЭТ» ведет изготовление и поставку компонентов системы бланкета ИТЭР.

Бланкет реактора ИТЭР состоит из 440 защитных модулей, зафиксированных на внутренней поверхности вакуумной камеры с помощью специально предусмотренной системы крепления. Бланкет условно разделен на три части – внутренний (модули № 1–6), верхний свод камеры (модули № 7–10) и внешний (модули № 11–18). В свою очередь каждый модуль – сборочная единица, включающая первую стенку (энергонапряженный компонент, обращенный к плазме) и защитный блок.

В период до 2010 года в НИКИЭТ проводились расчетно-конструкторские, экспериментально-исследовательские и технологические работы по защитным блокам модулей бланкета ИТЭР. В результате этих работ были выполнены макеты, полученные механической обработкой (рис. 2; анимации о защитных блоках № 12 и 16). В дальнейшем структура поставочных комплектов изменилась. Для Российской Федерации было принято решение о замене поставочного комплекта защитных блоков на блоки первых стенок, способных выдерживать тепловой поток из плазмы до 5 МВт/м^2 .



Рис. 2. Полномасштабные макеты защитных блоков № 16 (слева) и № 8 (справа)



Анимация «Защитный блок № 12»



Анимация «Защитный блок № 16»

В течение 2014 г. Проектный центр ИТЭР подписал два соглашения о поставке внутрикамерного оборудования с Международной организацией (МО) ИТЭР:

1.6.P1A.RF.01. Соглашение о поставке теплонапряженных панелей первой стенки;

РА 1.6.P3.RF.01. Соглашение о поставке соединителей модулей blankets.

В рамках Соглашения о поставке соединителей модулей blankets (СМБ) АО «НИКИЭТ» принимает участие как основной поставщик 100 % изделий, входящих в поставочный комплект, что подтверждается приказом №1/96-П Госкорпорации «Росатом». Одновременно АО «НИКИЭТ» совместно с АО «НИИЭФА имени Д.А. Ефремова» принимает участие в изготовлении и поставке элементов панелей первой стенки (ППС) для 40 % ППС (179 изделий) в рамках Соглашения о поставке теплонапряженных ППС на площадку ИТЭР.

В соответствии с требованиями системы менеджмента качества МО ИТЭР АО «НИКИЭТ» разработало и утвердило план качества в рамках Соглашения о поставке ППС в ноябре 2014 г., а в рамках Соглашения о поставке СМБ – в апреле 2015 г.

Панели первой стенки

Панели первой стенки (ППС) имеют следующее функциональное назначение:

- формирование поверхности, обращенной к плазме, с использованием материалов с низким атомным числом (Z);
- восприятие потока заряженных частиц из плазмы и радиационных нагрузок в условиях нормальной эксплуатации реактора ИТЭР;
- защита внутрикамерных компонентов и вакуумной камеры от непосредственного контакта с плазмой и «убегающими» электронами при отклонении от условий нормальной эксплуатации ИТЭР;
- первый (заменяемый в условиях горячих камер) защитный барьер от радиационного повреждения для внутрикамерных компонентов.

ППС является обращенным к плазме внутрикамерным компонентом ИТЭР (габаритные размеры панели в тороидальном, полоидальном и радиальном направлениях составляют $\approx 1400 \times 1100 \times 300$ мм соответственно) механически фиксируется на фронтальной (обращенной к плазме) поверхности защитного блока посредством специально предусмотренной системы крепления.

Теплонапряженная ППС способна воспринимать тепловой поток до 5 МВт/м², действующий из плазмы. Циркуляция водяного теплоносителя организована по последовательной схеме: теплоноситель подается в ППС, а затем, после прохождения трактов охлаждения конструктивных элементов первой стенки, поступает на вход защитного блока.

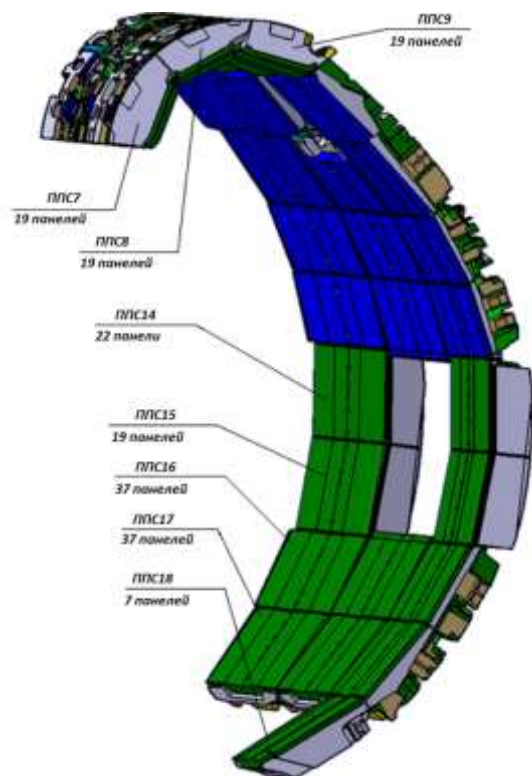


Рис. 3. Количество и расположение ППС, входящих в поставочный комплект

АО «НИКИЭТ» совместно с АО «НИИЭФА» изготавливают и поставляют 179 ППС (рис. 3), включая запасные (по одной для каждого ряда). Ядерное оборудование, работающее под давлением (декрет № 99-1046 от 13.12.1999), и выведены из-под действия ESPN.

АО «НИКИЭТ» совместно с АО «НИИЭФА» изготавливают и поставляют 179 ППС (рис. 3), включая запасные (по одной для каждого ряда).

В поставочный комплект входят 15 основных и 18 дополнительных вариантов исполнения ППС. Конструкция дополнительных вариантов исполнения ППС отличается от основного варианта наличием дополнительных технологических проходок и пазов под размещение диагностического

оборудования. Перечень основных вариантов и исполнений представлен в табл. 1.

Таблица 1. Перечень основных и дополнительных вариантов исполнения ППС

Ряд	Тип исполнения (количество, шт.)		Общее количество панелей, шт.
	основной	дополнительный	
ППС 7	A (12)	AR (2), AY (2), AZ (2)	18
ППС 8	A (12)	AM (1), AN (2), AX1 (1), AY1N (1), AZ1 (1),	18
ППС 9	A (18)	-	18
ППС 14	A (9) NDL (1) NC (2) NE (1)	AND (1) ADL (3) ADR (2) ND (2)	21
ППС 15	A (6) S (3) NC (1) NE (1)	AND (1) ADL (3) ADR (2) NCA (1)	18
ППС 16	AD (12)	A (21) S (3)	36
ППС 17	A (36)	-	36
ППС 18	E (3)	B (3)	6

Каждая ППС является сборочной единицей, включающей теплонапряженные компоненты, обращенные к плазме (пальцы первой стенки), несущую конструкцию первой стенки (НКПС), защитный тепловой экран, систему крепления ППС к защитному блоку и систему электрической связи. Общий вид

ППС 14, тип А представлен на рис. 4.

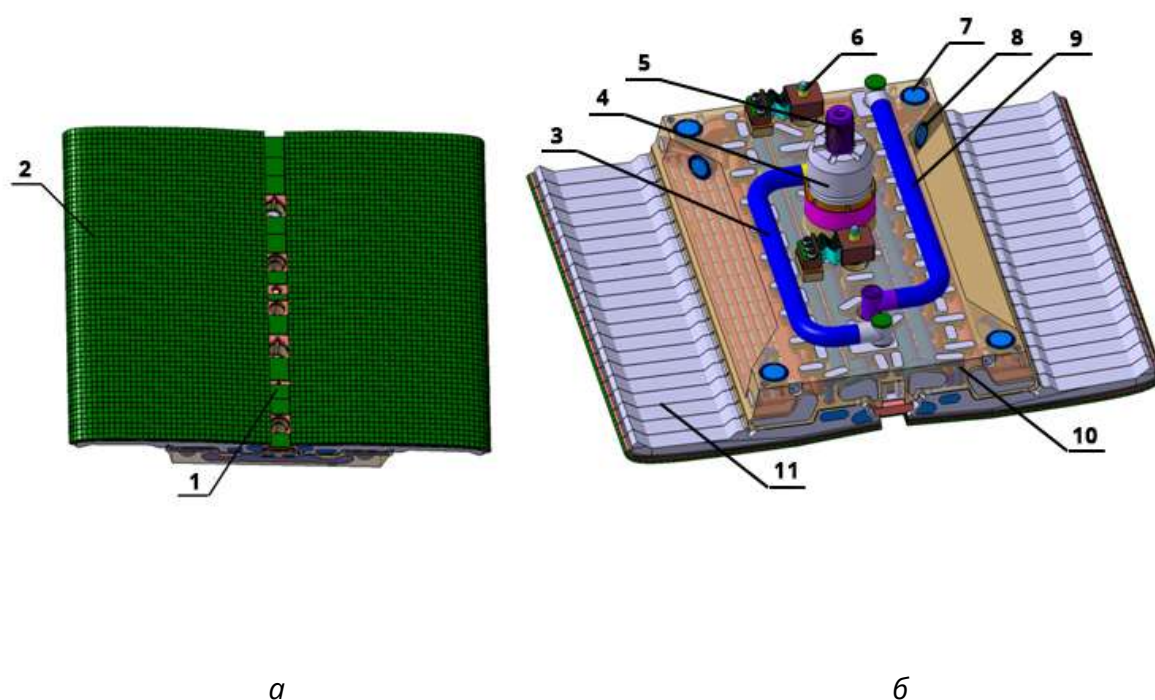


Рис. 4. Вид ППС 14, тип А со стороны плазмы (а) и защитного блока (б):

1 – защитный тепловой экран; 2 – защитное покрытие; 3, 9 – патрубок подвода и отвода теплоносителя соответственно; 4 – резьбовой стакан; 5 – болт системы крепления; 6 – электрический соединитель; 7,8 – полоидальные контактные электроизолирующие накладки (КЭИН); 10 – НКПС; 11 – пальцы первой стенки

АО «НИКИЭТ» отвечает за изготовление и поставку в АО «НИИЭФА» для финальной сборки ППС следующих компонентов: корпуса пальцев первой стенки, НКПС, системы крепления ППС к защитному блоку и системы электрической связи. Корпус пальца ППС представлен на рис. 5, количество пальцев различное для каждого типа ППС (28–40 штук).

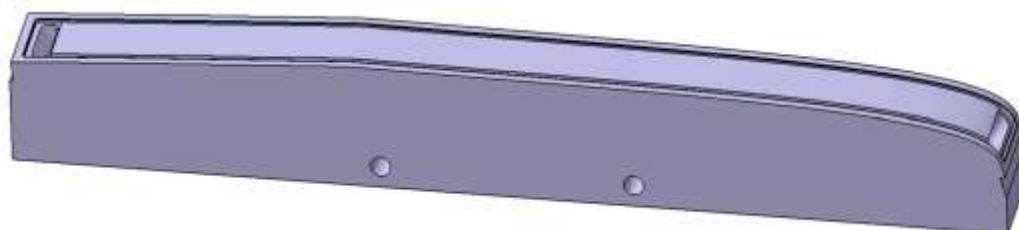


Рис. 5. Корпус пальца ППС

НКПС – металлоконструкция с фасонной внешней конфигурацией – имеет форму двутавра с наклонными полками (в терминологии МО ИТЭР – X-shape), с размещенными внутри полоидальными и радиальными отверстиями, формирующими систему охлаждения. Конструкционный материал – сталь 316L(N)-IG. Общий вид НКПС представлен на рис. 6.

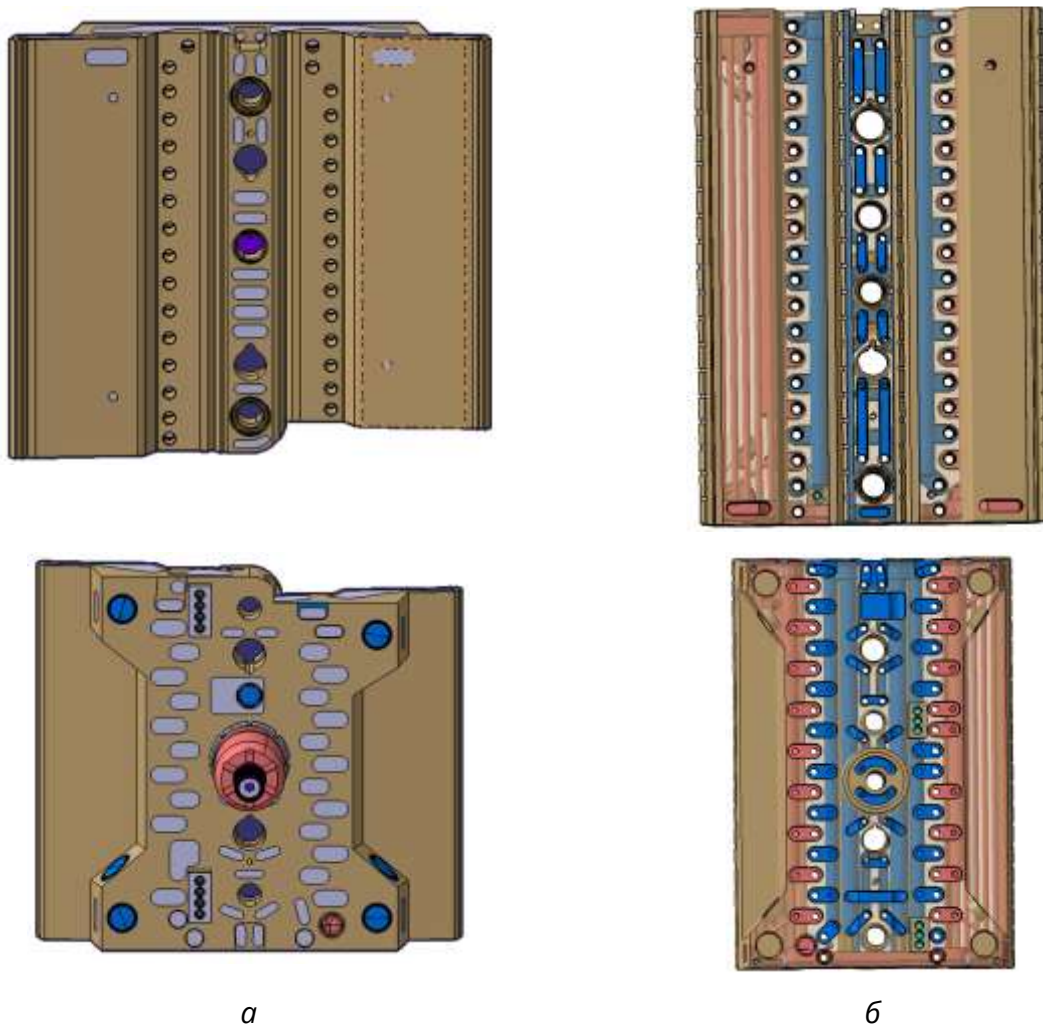


Рис. 6. Общий вид НКПС со стороны плазмы (вверху) и защитного блока (внизу):

а – ППС 9, тип А; б – ППС 14, тип А

Полоидальные каналы системы охлаждения выполняются на специальном оборудовании для глубокого сверления. Максимальная глубина составляет 1335 мм для ППС 18, тип Е. Для приварки крышек каналов охлаждения предполагается использование электронно-лучевой сварки.

Система крепления ППС (рис. 7) позволяет обеспечивать работоспособность ППС при действии комбинации электромагнитных сил и циклической тепловой нагрузки, возникающих нормальных условиях работы реактора и срывах плазмы. Для обеспечения электрической изоляции ППС от защитного блока в конструкции элементов системы крепления используется электроизоляционное покрытие (ЭИП).

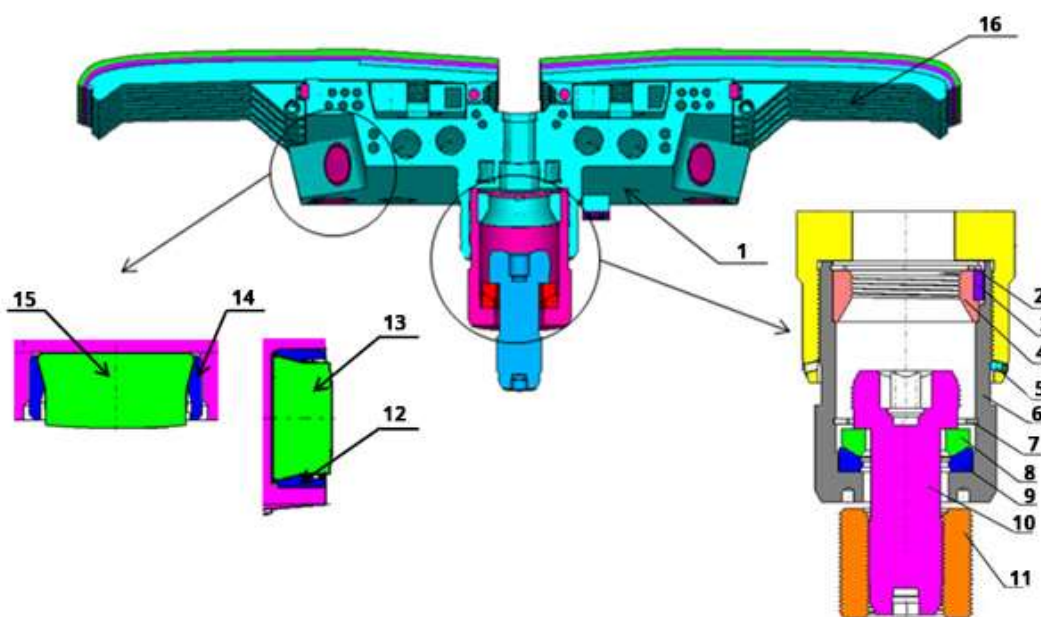


Рис. 7. Общий вид системы крепления ППС:

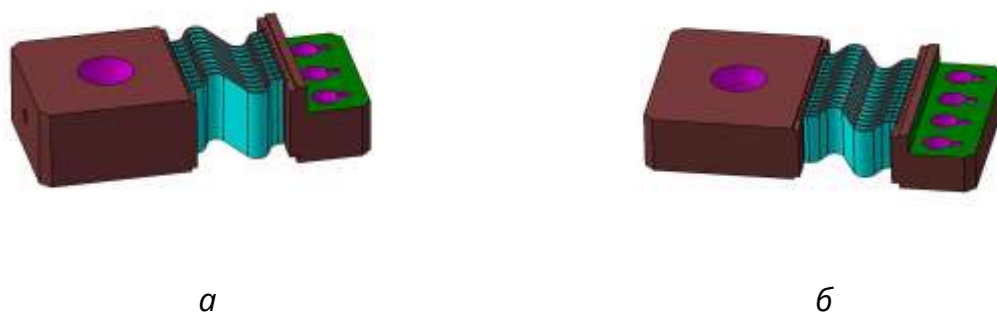
1 – НКПС; 2, 7 – стопорное кольцо; 3 – шпонка; 4 – парковочная гайка; 5 – стопорный винт;

6 – резьбовой стакан; 8 и 9 – сферическая и электроизолирующая шайбы; 10 – центральный болт; 11 – резьбовая втулка защитного блока; 12 и 14 – гайки радиальной и полоидальной контактных накладок; 13 и 15 – радиальная и полоидальная контактные накладки; 16 – пальцы первой стенки

Для обеспечения протекания тока при срывах плазмы от ППС к защитному блоку в конструкции ППС предусмотрены специальные устройства – электрические соединители (ЭС). Все остальные интерфейсы «ППС/защитный блок» снабжены ЭИП. Данный подход позволяет экранировать патрубки подвода теплоносителя и элементы системы крепления и уменьшить электромагнитные силы, действующие на элементы ППС. Существует два

варианта исполнения ЭС в зависимости от максимально возможного тока (до 210 кА), протекающего через ППС.

Специалисты АО «НИКИЭТ» разработали и согласовали в МО ИТЭР конструкцию ЭС, изготавливаемого из цельного бронзового бруска. ЭС выполнен в виде моноблочной конструкции прямоугольной формы с токоведущими ламелями (ТВЛ), расположенными в центральной части. Количество ТВЛ зависит от расположения ППС и составляет 10 для ППС внешнего blankets и 14 для ППС, расположенных в зоне верхнего свода вакуумной камеры (рис. 8).



*Рис. 8. Общий вид ЭС «ППС/защитный блок модуля blankets»:
а – с 10 ТВЛ; б – с 14 ТВЛ*

Соединители модулей blankets

СМБ являются частью системы blankets ИТЭР и выполняют следующие функции:

- крепление модулей blankets на внутренней стенке вакуумной камеры;
- электрическая изоляция модулей blankets от вакуумной камеры в местах возможного контакта;
- заземление объемных и поверхностных токов, наведенных в МБ на вакуумной камере;
- восприятие нагрузок, вызванных весом МБ, циклическим режимом работы установки и срывами плазмы.

СМБ не влияют на радиационную защиту реактора (non-PIС). Одновременно СМБ относятся к изделию первого класса качества по классификации ИТЭР. При

этом все элементы СМБ в соответствии с вакуумной классификацией ИТЭР относятся к классу VQC 1В.

Базовая конструкция крепления blankets реактора ИТЭР представляет собой систему из четырех гибких опор, фиксирующих модуль в радиальном направлении, и противомоментных ключей, установленных на вакуумной камере и ограничивающих перемещения модуля в полоидальном и тороидальном направлениях. Системы крепления модулей внутреннего и внешнего blankets схематично представлены на рис. 9. Модули внутреннего blankets удерживаются четырьмя гибкими опорами (Flexible supports), двумя межмодульными полоидальными ключами (Intermodular key) и одним центрирующим тороидальным ключом (Centering toroidal key). Модули внешнего blankets удерживаются четырьмя гибкими опорами и тремя полыми ключами, расположенными под модулем (Stub key).

В поставочный комплект входят следующие компоненты и сборки:

- гибкая механическая опора (ГМО) в сборе – 2109 комплектов;
- КЭИН межмодульных полоидальных (866 шт.) и центрирующих (425 шт.) ключей с элементами крепления;
- КЭИН ключей, расположенных на внутренней стенке вакуумной камеры в зоне внешнего blankets, с элементами крепления (1067 шт.);
- КЭИН межмодульных центрирующих ключей МБ 4 (8 шт.) с элементами крепления;
- ЭС с элементами крепления и биметаллический пьедестал вакуумной камеры (1052 комплекта)

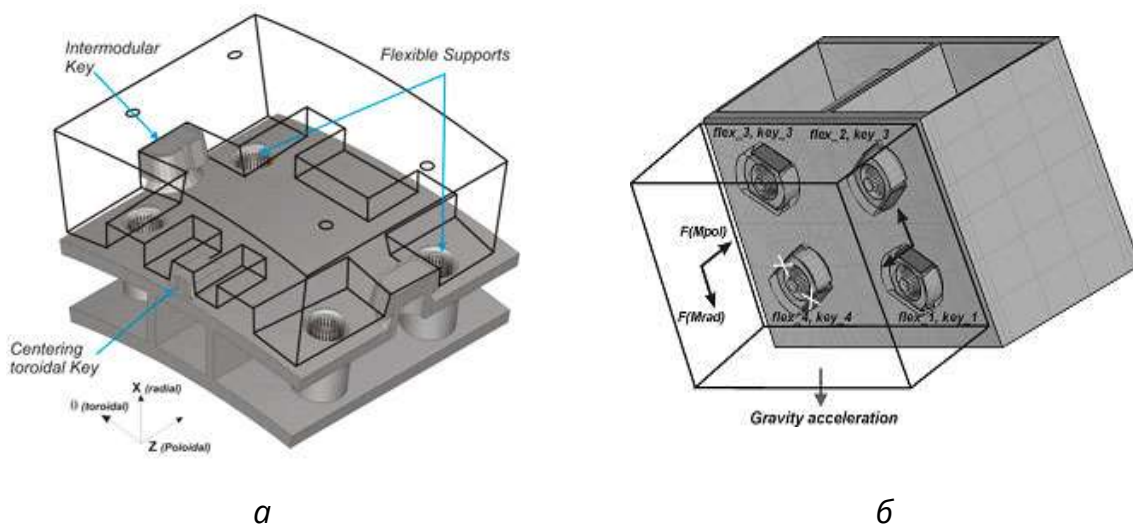


Рис. 9. Система крепления модулей внутреннего (а) и внешнего (б) blankets

ГМО устанавливается на тыльной поверхности защитного блока и используется для крепления модуля blankets (МБ) на внутренней стенке ВК. Общий вид ГМО представлен на рис. 10. Конструкция ГМО позволяет закрепить МБ на внутренней стенке ВК, при этом компенсируя тепловое расширение МБ.

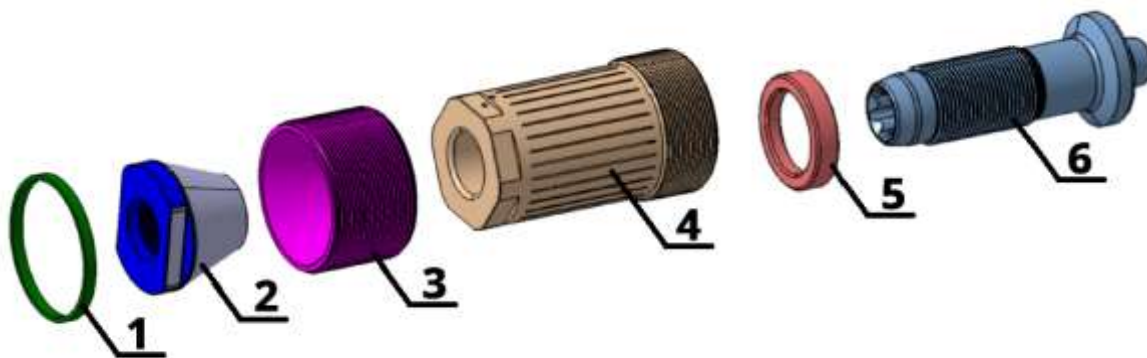


Рис. 10. ГМО модуля blankets ИТЭР:

1 – проставка; 2 – коническая гайка; 3 – коническая втулка; 4 – гибкий картридж; 5 – сферическая шайба; 6 – болт М64

Конструкционный материал гибкого картриджа – сплав Alloy 718. Сталь марки Grade 660 используется в качестве конструкционного материала болта, а коническая втулка выполнена из алюминиевой бронзы.

Для исключения схватывания в резьбовом соединении «болт/коническая гайка» с целью обеспечения возможности монтажа/демонтажа МБ, а также уменьшения коэффициента трения в резьбе при затяжке болта ГМО в конструкцию введено антисхватывающее (уменьшающее трение) покрытие на базе MoS_2 .

Для восприятия электромагнитных сил, действующих на МБ при срывах плазмы, в конструкцию МБ введены КЭИН. Общий вид КЭИН различных вариантов исполнения с элементами крепления представлен на рис. 11. Следует отметить, что на рабочей поверхности КЭИН выполнена сфера радиусом 300 мм. Для обеспечения электроизоляции защитного блока от вакуумной камеры боковая и тыльная поверхности КЭИН снабжены ЭИП. Для уменьшения сдвиговых сил, действующих на КЭИН, на сферическую поверхность нанесено уменьшающее трение покрытие на базе MoS_2 .

В силу геометрических особенностей МБ 15, призматические и цилиндрические КЭИН конструктивно отличаются по исполнению по сравнению с КЭИН, применяемыми для остальных МБ (рис. 12).

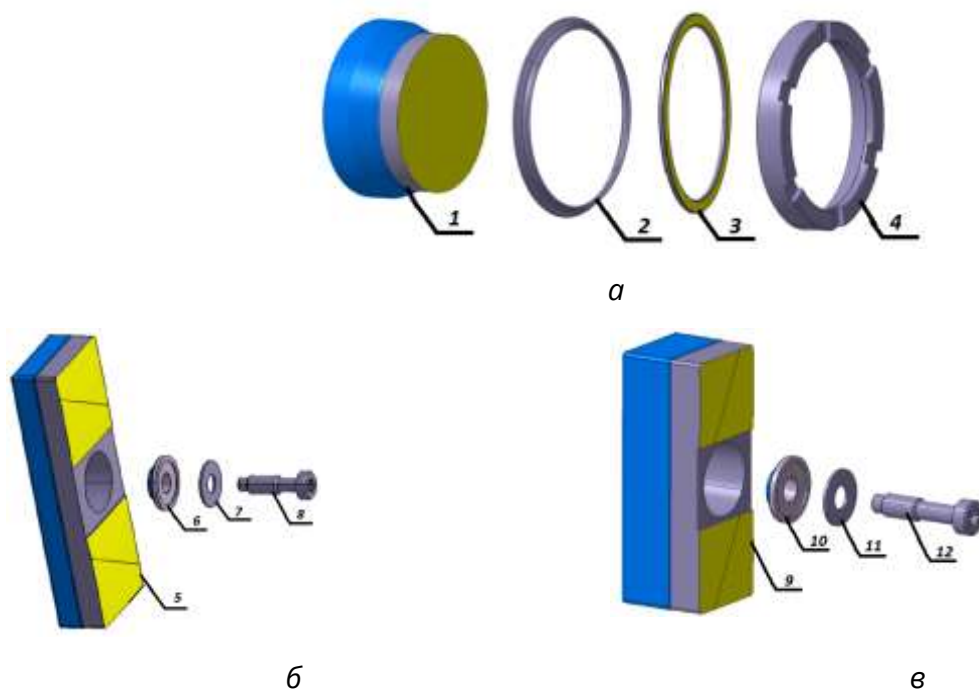


Рис. 11. КЭИН модулей blankets ИТЭР:
а – межмодульного полоидального ключа; б – ключа вакуумной камеры;
в – стандартного центрирующего ключа;

1 – цилиндрическая КЭИН; 2 – гибкий элемент; 3, 6, 10 – шайба с ЭИП; 4 – резьбовое кольцо;
 5 – призматическая КЭИН; 7 – дисковая пружина; 8 – болт М12×1,75; 9 – призматическая КЭИН центрирующего ключа; 11 – дисковая пружина; 12 – болт

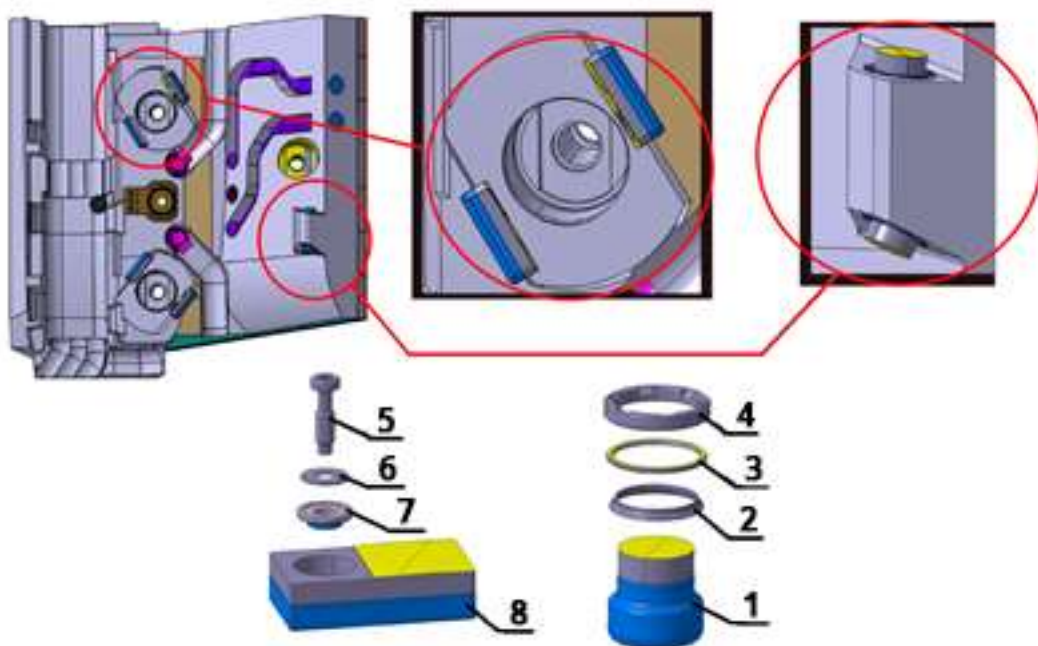


Рис. 12. КЭИН модуля blankets № 15:

1 – цилиндрическая КЭИН; 2 – гибкий элемент; 3, 7 – шайба с ЭИП; 4 – резьбовое кольцо;
 5 – болт М12×1,75; 6 – дисковая пружина; 8 – призматическая КЭИН

Для заземления токов, наведенных в МБ при срывах плазмы, каждый МБ снабжен двумя ЭС на интерфейсе «модуль blankets/вакуумная камера». ЭС представляет собой центральный и боковой фланцы, соединенные группой волнообразных ТВЛ (рис. 13).

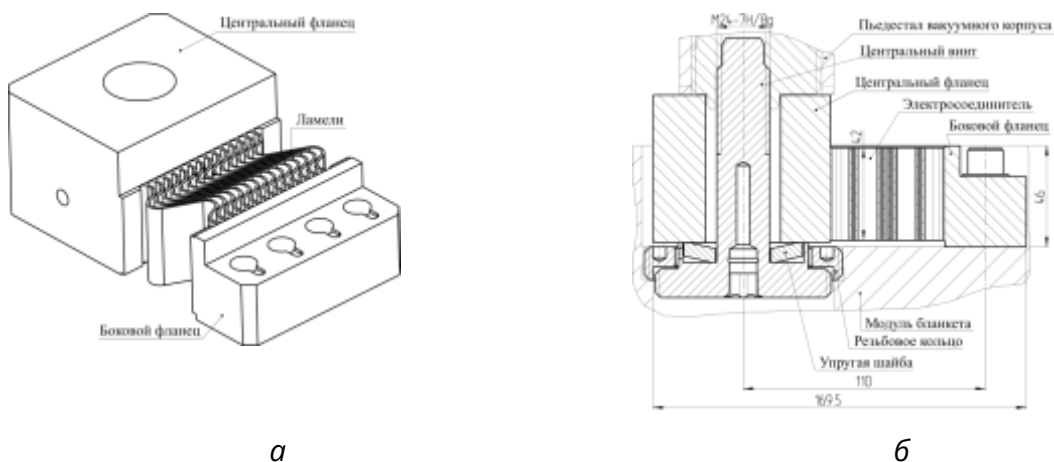


Рис. 13. ЭС «модуль blankets/вакуумная камера»:

а – общий вид; б – с элементами крепления

Со стороны вакуумной камеры выполнен биметаллический пьедестал (рис. 14). Изготовление биметаллического пьедестала предполагается с использованием технологии горячего изостатического прессования (ГИП).

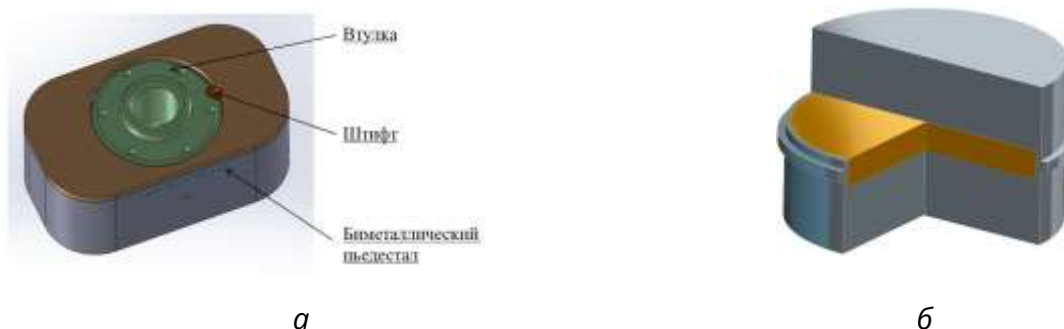


Рис. 14. Пьедестал ЭС «модуль blankets/вакуумная камера» (а) и заготовка для ГИП (б)

Материалы полуфабрикатов

Для обеспечения изготовления изделий в соответствии с требованиями Соглашений о поставке АО «НИКИЭТ» должно закупить в период 2018–2022 гг. полуфабрикаты из различных материалов (табл. 2).

В 2016 году первая партия кованых полуфабрикатов из стали 316LN-IG, включающая поковки (1200×1000×200 мм), бруски (620×90×60 мм) и прутки (∅ 140 и 180 мм) и изготовленная на заводе Forgiature A.Vienna (Италия), поставлена в АО «НИКИЭТ».

Таблица 2. Масса полуфабрикатов из поставляемых материалов, кг

Материал	Соединители модулей blankets	Панели первой стенки
CuCrZr	20 400	3 625
Al-bronze	58 500	21 406
Inconel 718	128 700	2 542

Grade 660	44 800	6 100
316L/316I(n)-IG	33 600	82 7184

Квалификация процессов изготовления

В соответствии с требованиями МО ИТЭР АО «НИКИЭТ» должно выполнить квалификацию следующих технологических процессов:

- глубокого сверления каналов охлаждения НКПС на глубину 1000 мм диаметрами 15–42 мм;
- сварных соединений, входящих в конструкцию ППС. Рассматриваются два варианта сварки – электронно-лучевая и аргонодуговая;
- нанесения ЭИП газотермическим (плазменным или детонационным) методом с использованием алюмомагнезиальной шпинели ($MgAl_2O_4$) или оксида алюминия (Al_2O_3) в качестве материала ЭИП;
- нанесения антисхватывающего/уменьшающего трение покрытия на резьбовые соединения компонентов системы бланкета ИТЭР;
- получения биметаллического соединения бронза/сталь для пьедестала ЭС «модуль бланкета/вакуумная камера».

В рамках подготовки к квалификации технологических процессов, используемых при изготовлении изделий, входящих в поставочные комплекты Соглашений о поставке внутрикамерного оборудования, специалисты АО «НИКИЭТ» проводят разработку программ квалификации и испытаний по каждому технологическому процессу. Квалификация процессов изготовления согласно графику МО ИТЭР будет проходить в период 2017–2020 гг.

Разработанные технологические процессы

В АО «НИКИЭТ» создана производственная база, оснащенная новым высокоточным технологическим оборудованием, позволяющим обеспечить полный цикл изготовления изделий ИТЭР, входящих в поставочные комплекты. На текущий момент созданы участки механической и шлифовальной

обработки, термической обработки, очистки изделий, а также сварочный и измерительный участки.

Одновременно новая производственная площадка может быть использована для изготовления изделий различного функционального назначения с привлечением российских и иностранных заказчиков.

Участие в проекте ИТЭР позволило разработать и освоить технологические процессы, которые могут быть применены не только для изготовления изделий ИТЭР, но и элементов термоядерных и ядерных установок.

Специалисты АО «НИКИЭТ» в рамках проекта ИТЭР разработали и освоили следующие технологические процессы:

- изготовление элементов системы электрической связи с токоведущими ламелями толщиной 1,2 мм (рис. 15);
- изготовление изделий бланкета ИТЭР с ЭИП. Нанесение ЭИП выполняется на базе алюмомагнезиальной шпинели ($MgAl_2O_4$) или оксида алюминия (Al_2O_3) на элементы системы крепления ППС и МБ методом газотермического напыления (рис. 16);
- изготовление биметаллических соединений с использованием наплавки аргонодуговой сваркой и горячего изостатического прессования (рис. 17);
- глубокого сверления каналов охлаждения диаметром 12–42 мм в НКПС (рис. 18).

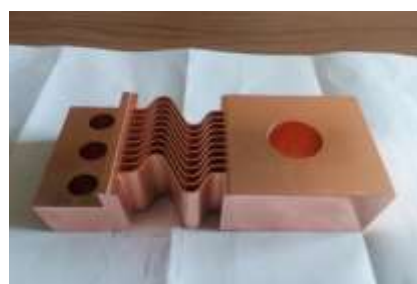
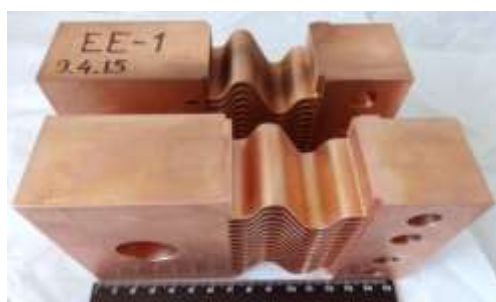
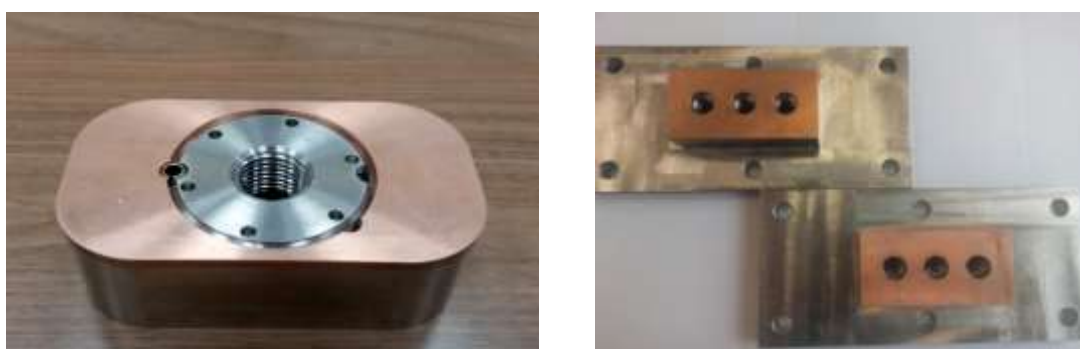


Рис. 15. Полномасштабные макеты ЭС модулей бланкета ИТЭР с 14 (а) и 10 (б) токоведущими ламелями



а *б* *в*
 Рис. 16. Изделия ИТЭР с ЭИП – КЭИН системы крепления:

а – ППС; *б* – призматические модули внешнего бланкета; *в* – цилиндрические модули внутреннего бланкета

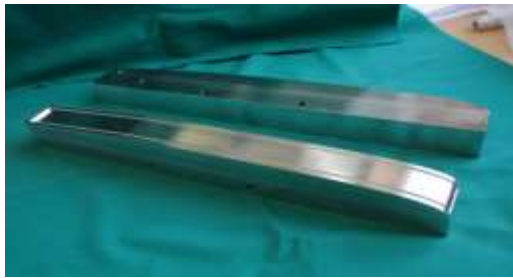


а *б*
 Рис. 17. Изготовленные биметаллические пьедесталы:
а – «МБ/вакуумная камера» ; *б* – «ППС/защитный блок МБ»



а *б*
 Рис. 18. Макеты изделий ИТЭР с выполненными глубокими отверстиями:
а – технологический; *б* – НКПС

В рамках отработки технологии изготовлены полномасштабные макеты различных компонентов, входящих в поставочные комплекты Соглашений о поставке ППС и соединителей модулей бланкета (рис. 19–20).



а



б



в



г

*Рис. 19. Макеты компонентов ППС:
а – корпуса пальцев; б – НКПС; в – элементы системы крепления;
г – электроизоляционные шайбы*



а



б

*Рис. 20. Макеты компонентов СМБ:
а – детали гибкой механической опоры; б – гибкая механическая опора в сборе*

Экспериментальное обоснование конструкций компонентов бланкета ИТЭР

Параллельно с разработкой конструкции и технологических процессов изготовления внутрикамерных компонентов специалисты АО «НИКИЭТ» провели экспериментальное обоснование работоспособности компонентов поставочных комплектов на базе имеющегося испытательного оборудования при действии нагрузок, характерных для бланкета ИТЭР.

В рамках исследования работоспособности элементов системы крепления ППС выполнены циклические механические испытания КЭИН и центрального болта ППС при комнатной и повышенной температурах.

По результатам испытаний подтверждена работоспособность КЭИН с ЭИП для всех режимов циклического нагружения, выполнено более 15 000 циклов нагружения с силой от 250 кН до 850 кН. Одновременно при испытании болтов не зафиксировано самопроизвольного откручивания и повреждений или разрушений при нагружении силой 600 кН/150 кН в течении 15 000 циклов (рис. 21).

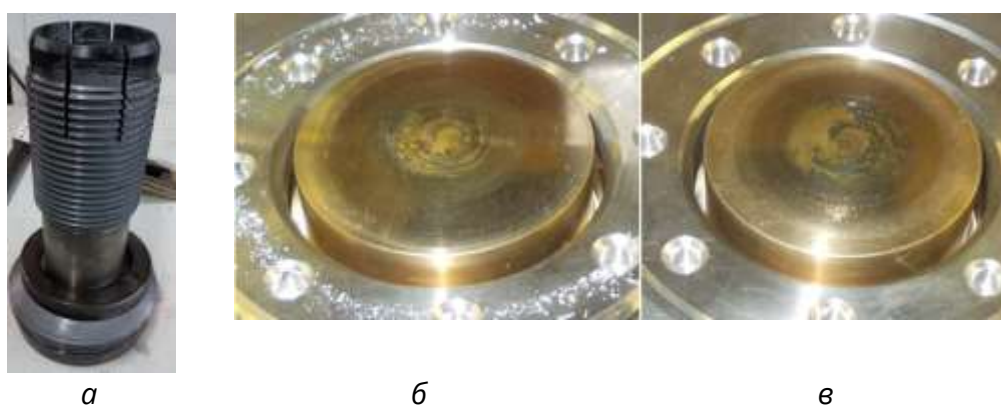


Рис. 21. Центральный болт ППС (а) и пара КЭИН (б, в) после циклических механических испытаний



Рис. 22. Опытный макет ГМО после испытаний

В рамках экспериментального подтверждения работоспособности ГМО выполнены механические испытания под комбинацией циклической сжимающей /растягивающей силы ± 800 кН, бокового смещения фланца ГМО до 3 мм и разворота фланца ГМО на 3

град. По результатам испытаний показано, что конструкция ГМО обеспечивает 20-кратный запас по числу циклов при статическом циклическом нагружении, двукратный запас по перемещениям и полуторакратный запас по

максимальной силе. Далее выполнено испытание ГМО до разрушения. Опытный макет ГМО после разрушения картриджа представлен на рис. 22.

Проведены испытания призматических КЭИН с различными радиусами сферической поверхности (500 и 1000 мм). Нагружение проводилось силами 1000 и 1400 кН, соответствующими II и III категориям нагружения. Количество циклов нагружения принято равным 400 для силы 1000 кН и один цикл для силы 1400 кН. КЭИН и элементы испытательной оснастки после испытаний представлены на рис. 23.

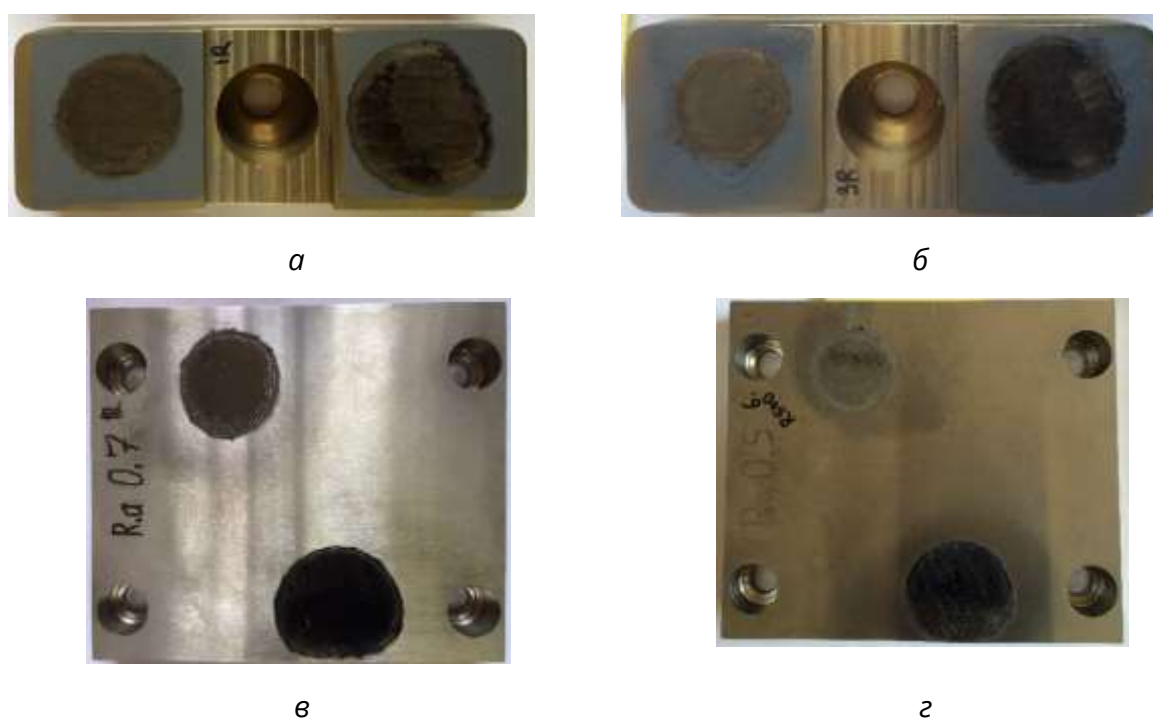


Рис. 23. КЭИН из состава СМБ после 400 циклов нагружения силой 1000 кН:

а, б – призматическая КЭИН с радиусом сферы 1000 и 500 мм соответственно;

в, г – соответствующие ответные детали

По результатам испытаний продемонстрировано сохранение целостности ЭИП на опытных макетах КЭИН под действием циклических нагрузок II и III категории. Отмечено уменьшение толщины КЭИН, для обоих вариантов исполнения радиуса сферической поверхности (500 мм и 1000 мм), на 0,2 мм.

Для подтверждения работоспособности конструкции ЭС проведены механические циклические и электрические испытания. Механические испытания ЭС были разделены на 2 этапа. На 1-м этапе опытный образец был испытан с перемещениями, утвержденными МО ИТЭР для квалификационных циклических испытаний ЭС. На 2-м этапе испытания продолжены с более консервативными значениями, учитывающими запас по числу циклов и по нагрузке.

ЭС, прошедший испытания представлен на рис. 24. Повреждений и трещин на 1-м этапе испытаний не зафиксировано. В последующих опытах (2-й этап) амплитуда циклических перемещений образца была увеличена. При значении циклического смещения $\pm 1,8$ мм было зафиксировано появление трещин.

По результатам испытаний механическая циклическая прочность образца ЭС, изготовленного по технологии АО «НИКИЭТ», обеспечивается с 20-кратным запасом по числу циклов нагружения, и двукратным запасом по амплитуде перемещений.



Рис. 24. ЭС после 1-го (а) и 2-го (б) этапов механических циклических испытаний

Для моделирования электрических условий работы ЭС, а именно, протекание импульсных токов с максимальным действующим значением 137 кА продолжительностью 300 мс, выполнены электрические испытания для конструкции ЭС с механической фиксацией ТВЛ. Испытание проводилось для двух вариантов контакта ЭС/оснастка: «сталь-бронза» и «сталь-сталь» (рис. 25).



a



б



в



г

*Рис. 25. ЭС после 3-го этапа электрических испытаний:
а – контакт «бронза-бронза» на интерфейсе с ППС и защитным блоком;
б – интерфейс «бронза-бронза»; в – контакт «бронза-сталь» на интерфейсе с ППС и
защитным блоком; г – интерфейс «бронза-сталь»*

По результатам электрических испытаний разрушение ТВЛ зафиксировано лишь после 10 импульсов с максимальным током 137 кА, при этом требуемое количество циклов – 1, что подтверждает работоспособность ЭС в условиях нагружения, максимально приближенных к условиям работы в ИТЭР. Однако необходимо обеспечить контакт «бронза-бронза» на интерфейсе ЭС с ППС и защитным блоком для исключения подгорания контактов и пластических деформаций на этом интерфейсе.

Экспериментальные бридинговые модули бланкета термоядерного реактора ДЕМО для испытаний в ИТЭР

В АО «НИКИЭТ» в рамках сотрудничества Российской Федерации с Республикой Индией проводится расчетно-конструкторские и опытно-экспериментальные работы по созданию испытательного МБ для ИТЭР на основе концепции свинцово-литиевого blankets с керамическим бриддером (СЛКБ). Конструкция СЛКБ испытательного МБ представлена на рис. 26–27.

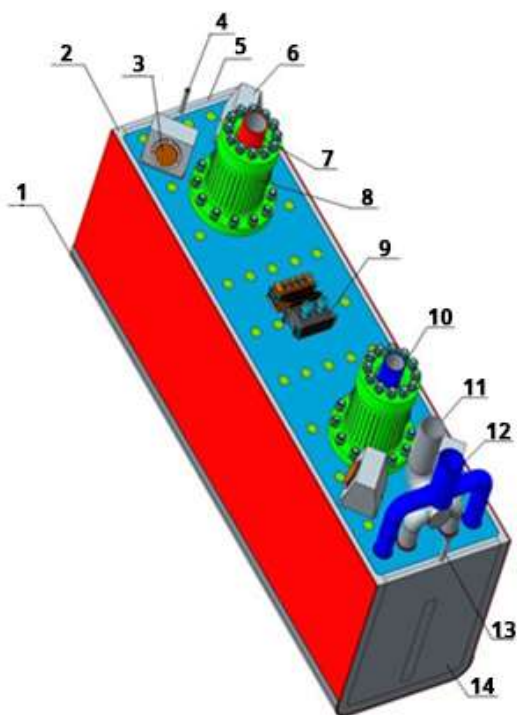


Рис. 26. Общий вид СЛКБ испытательного МБ:

- 1 – защитное покрытие; 2 – ПС; 3 – КЭИН; 4 – входной патрубок газа-носителя; 5, 14 – крышки корпуса; 6 – противомоментный ключ; 7 – выходной патрубок гелиевого теплоносителя;*
- 8 – гибкая механическая опора; 9 – электрический соединитель; 10 – входной патрубок гелиевого теплоносителя; 11 – выходной патрубок жидкометаллического теплоносителя (ЖМТ);*
- 12 – входной патрубок ЖМТ; 13 – выходной патрубок газа-носителя*

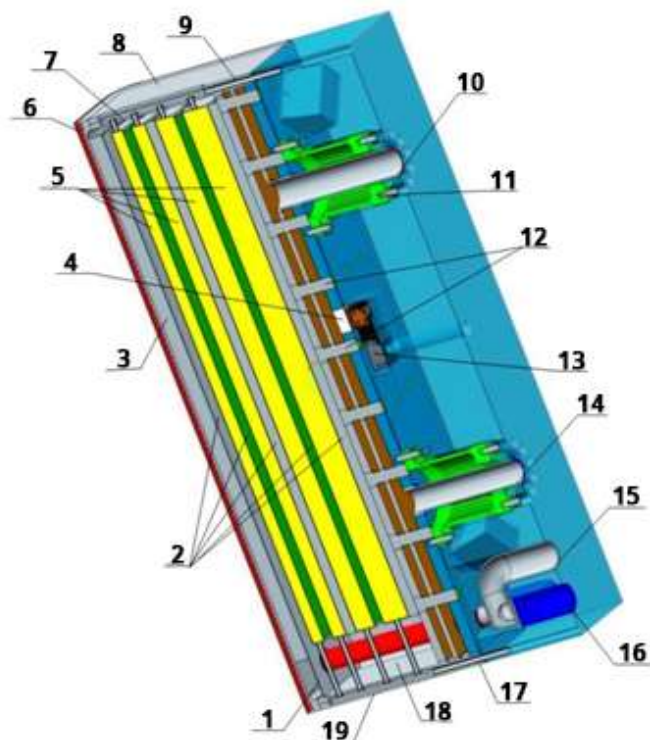


Рис. 27. Продольный разрез СЛКБ испытательного МБ:

1 – перегородка разделительная зон течения ЖМТ; 2 – зона подъемного течения ЖМТ; 3 – зона опускного течения ЖМТ; 4 – биметаллический адаптер; 5 – блок с керамическим бридером; 6 – ПС; 7 – перепускной коллектор ЖМТ; 8, 19 – крышки корпуса; 9 – входной патрубок газа-носителя; 10 – выходной патрубок газового теплоносителя; 11 – гибкая механическая опора; 12 – ребра жесткости блока газовых коллекторов; 13 – электрический соединитель; 14 – входной патрубок газового теплоносителя; 15 – выходной патрубок ЖМТ; 16 – входной патрубок ЖМТ; 17 – выходной патрубок газа-носителя; 18 – входной коллектор ЖМТ

Для наработки трития в СЛКБ используются литиевая керамика (титанат лития Li_2TiO_3) и свинцово-литиевая эвтектика ($\text{Li}_{17}\text{Pb}_{83}$) с 90% обогащением по изотопу ^6Li . Эвтектика отводит тепло из бридерной зоны, а для охлаждения первой стенки и корпуса испытательного МБ используется гелий.

Данная концепция предоставляет возможность:

- поддержания в процессе эксплуатации необходимого содержания изотопа ^6Li в циркулирующем эвтектическом теплоносителе/бридере, компенсируя тем самым эффект выгорания данного изотопа в стационарном керамическом бридере;

- одновременной экспериментальной отработки двух термоядерных технологий (с газовым и жидкометаллическим теплоносителями) в составе единой конструкции;
- оценки целесообразности их совместного использования в проектах бланкетов перспективных термоядерных установок;
- отказа от использования токсичного бериллиевого размножителя нейтронов, что делает проект привлекательным с точки зрения безопасности.

Основной особенностью конструкции испытательного МБ является переход на последовательно-параллельную схему течения эвтектики с зонами подъемного и опускного течения с циркуляцией в системе параллельных полоидальных каналов, что позволяет существенно снизить МГД-потери давления (даже без ЭИП тракта эвтектик) и повысить выходную температуру эвтектики до 500 °С.

Керамические блоки в зоне воспроизводства трития размещаются в зоне подъемного течения эвтектики. Радиальная толщина каждого блока выбирается в соответствии с результатами нейтронно-физического расчета таким образом, чтобы обеспечить оптимальную скорость генерации трития, снизить неравномерность выгорания ядер ${}^6\text{Li}$ в керамике в процессе эксплуатации и, соответственно, повысить ресурс керамических блоков.

При оптимизации варианта конструкции испытательного МБ рассматривались различные схемы зоны воспроизводства трития, а также производился выбор оптимальной конфигурации тракта газового охлаждения корпуса испытательного МБ. Был произведен сравнительный анализ по всему комплексу характеристик с целью выбора оптимальной (для данного этапа проектирования) компоновки модуля. Конструкция испытательного МБ включает в себя две петли охлаждения (газовая и жидкометаллическая) и систему циркуляции газа-носителя. Газовая петля предназначена для

охлаждения металлоконструкции корпуса испытательного МБ. Жидкометаллическая петля служит для охлаждения зоны воспроизводства трития и наработки трития. Система прокачки газа-носителя предназначена для извлечения трития из керамического бридера (титанат лития, Li_2TiO_3), путем прокачки специальной газовой смеси ($\text{He}+0,2\% \text{H}_2$) под давлением 0,2 МПа. Основные технические характеристики конструкции СЛКБ испытательного МБ приведены ниже.

Основные технические характеристики конструкции СЛКБ испытательного МБ

Максимальные рекомендуемые температуры материалов, °С:

конструкционный материал (феррито-мартенситная сталь)	≤ 550
керамический бридер (метатитанат лития, Li_2TiO_3)	≤ 920
защитное покрытие первой стенки (бериллий, тип S-65)	≤ 660
интерфейс «литий-свинцовая эвтектика – феррито-мартенситная сталь»	≤ 500

Теплогидравлические и нейтронные характеристики:

расход, кг/с

гелиевого теплоносителя.	1,65
литий-свинцовой эвтектики.	9,4

входная температура, °С

гелиевого теплоносителя.	325
литий-свинцовой эвтектики.	325

давление, МПа

гелиевого теплоносителя.	0,8
литий-свинцовой эвтектики.	0,5

МГД-потери давления в тракте циркуляции ЛСЭ в ЭМ с изоляцией/без изоляции, кПа.

. 71/152

суммарная тепловая мощность испытательного МБ за счет нейтронного нагрева, кВт.

... 465

скорость наработки трития в испытательном МБ, Т/с.

$1,64 \times 10^{17}$

Совместно с ОАО «ИРМ» проведены следующие опытно-экспериментальные работы в обоснование проекта СЛКБ испытательного МБ:

- создан реакторный стенд (РИТМ-Ф) и проведены испытания макетов бридинговой зоны (с керамическим бридером) в режиме непрерывного выделения трития; испытаны прототипы оборудования тритиевой системы (рис. 28);

- пущен в эксплуатацию стенд исследования проницаемости изотопов водорода, на котором были проведены тестовые эксперименты (рис. 29);

- изготовлен стенд вне реакторных испытаний прототипа системы мониторинга (СМТ) испытательного МБ (рис. 30);

- разработаны проектные материалы на жидкометаллическую петлевую установку для реакторных испытаний моделей бридинговой зоны испытательного МБ на реакторе ИВВ-2М (рис. 31);

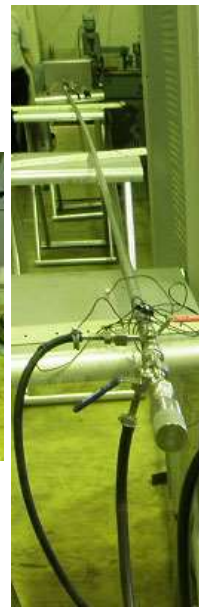
- подготовлена, согласована и подписана техническая программа сотрудничества между Институтом Индии (ИИП) и институтами Российской Федерации (АО «НИКИЭТ», АО «НИИЭФА» и РНЦ «КИ») по совместной разработке МБ для испытаний в ИТЭР (рис. 32).



Рис. 28.
Измерительная
часть станда
РИТМ-Ф.



Рис. 29. Общий вид станда
исследования
проницаемости изотопов
водорода

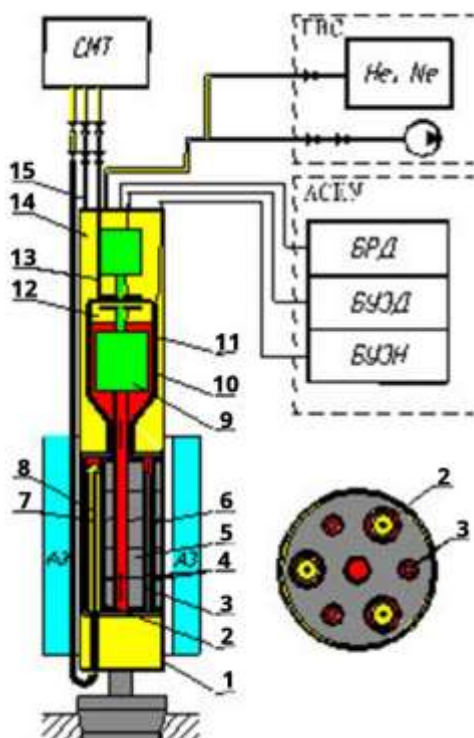


а

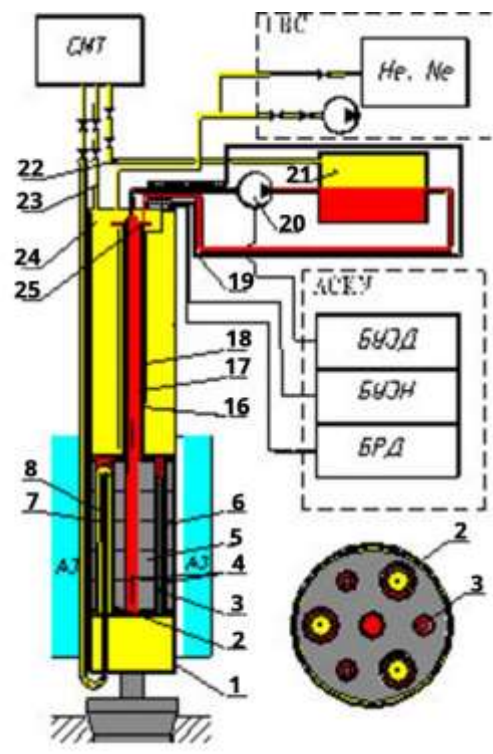


б

Рис. 30. Стенд вне реакторных испытаний
прототипа СМТ испытательного МБ: а – вид
на испытательный канал;
б – вид на технологическое оборудование



а



б

Рис. 31. Блок-схема канала-петли (а) и петли (б):

1 – корпус; 2 – образец на проницаемость; 3 – образец на коррозию; 4 – ячейки для образцов;
5 – обоймы; 6 – теплоноситель; 7 – капиллярная труба подачи гелия; 8 – отвод смеси
гелий-третий; 9 – циркуляционный насос; 10 – корпус расширителя; 11 – нагреватель; 12 –
полость зеркала теплоносителя; 13 – труба; 14 – полость канального устройства; 15 –
труба; 16 – труба 18×1мм; 17 – труба 12×1 мм; 18, 19 – нагреватели; 20 – насос; 21 –
емкость отбора третия; 22, 23 – труба; 24 – внутренняя полость ЭУ; 25 – коллектор



Рис. 32. Техническая программа сотрудничества между Институтом Индии и институтами России