

УДК 621.039.634

РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ, ИЗГОТОВЛЕНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОСНОВАНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ КОМПОНЕНТОВ СИСТЕМЫ БЛАНКЕТА ИТЭР

Ю.Г. Драгунов¹, А.Ю. Лешуков¹, Ю.С. Стребков¹, С.Ю. Кириллов¹, С.В. Макаров¹, П.Д. Трофимович¹,
В.Н. Ёлкин¹, М.Н. Свириденко¹, А.В. Размеров¹, Е.В. Паршутин¹, С.Э. Хомяков¹, В.Ю. Колганов¹,
В.М. Сафронов², А.Б. Путрик²

¹АО «НИКИЭТ», Москва, Россия

²Частное учреждение «ИТЭР-Центр», Москва, Россия

В 2014 г. Российская Федерация подписала с Международной организацией ИТЭР два Соглашения о Поставке компонентов blankets ИТЭР: № 1.6.P1A.RF.01 от 14 февраля 2014 г. «Теплонапряжённые панели первой стенки blankets ИТЭР» и № 1.6.P3.RF.01 от 19 декабря 2014 г. «Соединители модулей blankets ИТЭР». Соглашение о поставке № 1.6.P1A.RF.01 предполагает изготовление, испытание и поставку на площадку ИТЭР 179 теплонапряжённых панелей первой стенки, предназначенных для восприятия теплового потока из плазмы до 4,7 МВт/м². В реализации данного Соглашения о поставке задействованы два российских института: АО «НИИЭФА» и АО «НИКИЭТ». АО «НИИЭФА» является ответственным за изготовление энергонапряжённых (обращённых к плазме) компонентов первой стенки, а также осуществляет окончательную сборку изделий и их испытания. АО «НИКИЭТ» изготавливает и поставляет на площадку АО «НИИЭФА» для окончательной сборки полуфабрикаты несущих конструкций (НКПС) и корпусов энергонапряжённых компонентов, а также элементы систем механического крепления и электрической связи. В рамках Соглашения о поставке № 1.6.P3.RF.01 АО «НИКИЭТ» является единственным поставщиком соединителей модулей blankets: гибких механических опор, контактных электроизолирующих накладок и систем электрической связи «модуль blankets/вакуумная камера» в сборе. Данная статья кратко описывает совместную деятельность АО «НИИЭФА» и АО «НИКИЭТ» по реализации Соглашения о поставке № 1.6.P1A.RF.01 «Теплонапряжённые панели первой стенки blankets ИТЭР», а также содержит информацию о выполнении Соглашения о поставке № 1.6.P3.RF.01 «Соединители модулей blankets ИТЭР». Приведены результаты расчётно-конструкторских и экспериментальных работ по указанным соглашениям о поставке, полученные в период 2015, 2016 гг., а также результаты отработки технологии изготовления компонентов blankets ИТЭР.

Ключевые слова: ИТЭР, blanket, первая стенка, вакуумная камера, электрическая изоляция, тепловая нагрузка.

DEVELOPMENT OF DESIGN, MANUFACTURE AND EXPERIMENTAL PROOF OF OPERATIONAL AVAILABILITY OF ITER BLANKET COMPONENTS

Yu.G. Dragunov¹, A.Yu. Leshukov¹, Yu.S. Strebkov¹, S.Yu. Kirillov¹, S.V. Makarov¹, P.D. Trofimovich¹,
V.N. Yolkin¹, M.N. Sviridenko¹, A.V. Razmerov¹, E.V. Parshutin¹, S.E. Khomyakov¹, V.Yu. Kolganov¹,
V.M. Safronov², A.B. Putrik²

¹JSC «NIKIET», Moscow, Russia

²Private Institution «ITER-Center», Moscow, Russia

Two ITER blanket-relevant Procurement Arrangements (PA) were signed by Russian Federation and the ITER Organization in 2014: № 1.6.P1A.RF.01 «Heat Loaded ITER Blanket First Wall Panels» of 14 February, 2014 and № 1.6.P3.RF.01 «ITER Blanket Module Connectors» of 19 December, 2014. The first PA provides for the development, manufacturing, testing and procuring to the ITER site of 179 Enhanced Heat Flux (EHF) First Wall (FW) Panels. These FW panels have to withstand the heat flux from plasma to 4.7 MW/m². There are two institutes in Russian Federation responsible for the implementation of this Arrangement: JSC «NIEFA» (Efremov Institute) and JSC «NIKIET». JSC «NIKIET» will manufacture and deliver to the JSC «NIEFA» subproducts: FW load-bearing and beam structures, as well as all the elements of panel attachment system and electrical communications for final assembling, while JSC «NIEFA» will manufacture the plasma-facing EHF FW components, perform the final assembling of the panels and their testing. As for the second PA, the JSC «NIKIET» is the only supplier of the ITER blanket module connectors. It will manufacture and procure flexible mechanical blanket supports, electrical insulating key pads and shield block/vacuum chamber electrical connectors in assembly. This article briefly describes the joint activity of JSC «NIKIET» and JSC «NIEFA» in the framework of 1.6.P1A.RF.01 PA and the information on the implementation of the second PA. The main achievements on both PAs (during 2015 and 2016) are presented and also critical issues and plans are underlined.

Key words: ITER, blanket, first wall, vacuum chamber, electrical insulation, heat load.

DOI: 10.21517/0202-3822-2016-39-4-13-26

ВВЕДЕНИЕ

Международный термоядерный экспериментальный реактор (ИТЭР) сооружается в настоящее время во Франции, в данном проекте принимают участие Европейский Союз, Республика Индия, Китайская Народная Республика, Республика Корея, Российская Федерация, США и Япония. В 2009 г. создано Частное учреждение Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом» «Проектный центр

ИТЭР», являющееся ответственным за вклад в натуральной форме Российской Федерации в проект ИТЭР. В течение 2014 г. Проектный центр ИТЭР подписал два соглашения о поставке внутрикамерного оборудования с Международной организацией (МО) ИТЭР: Соглашение о поставке теплонапряжённых панелей первой стенки № 1.6.P1A.RF.01 от 14 февраля 2014 г. и Соглашение о поставке соединителей модуля blankets № PA 1.6.P3.RF.01 от 19 декабря 2014 г. В рамках Соглашения о поставке соединителей модулей blankets (СМБ) АО «НИКИЭТ» принимает участие как основной поставщик 100% изделий [1], входящих в поставочный комплект. Одновременно АО «НИКИЭТ» принимает участие в изготовлении и поставке элементов панелей первой стенки (ППС) для 40% ППС (179 штук) в рамках Соглашения о поставке ППС на площадку ИТЭР [2]. Это соглашение реализуется совместно с АО «НИИЭФА имени Д.В. Ефремова». В соответствии с требованиями системы менеджмента качества (СМК) МО ИТЭР АО «НИКИЭТ» разработало и утвердило план качества (ПК) в рамках Соглашения о поставке ППС (№ 1.6.P1A.RF.01) в ноябре 2014 г., в апреле 2015 г. — в рамках Соглашения о поставке СМБ. В 2016, 2017 гг. планируется квалификация основных технологических процессов, используемых при изготовлении внутрикамерного оборудования, поставляемого АО «НИКИЭТ». Данная статья посвящена реализации АО «НИКИЭТ» соглашений о поставке внутрикамерного оборудования, включая конструкторские и экспериментальные работы, выполненные в 2015, 2016 гг.

РАБОТЫ АО «НИКИЭТ» В РАМКАХ СОГЛАШЕНИЯ О ПОСТАВКЕ ППС

ППС является теплонапряжённым компонентом системы blankets, обращённым к плазме и механически закреплённым на защитном блоке (ЗБ) с помощью системы крепления (СК). Теплонапряжённая ППС способна воспринимать тепловой поток из плазмы до $4,7 \text{ МВт/м}^2$.

ППС является компонентом, не влияющим на безопасность реактора (non-Safety Important Component), так как никаких функций с точки зрения обеспечения безопасности не возложено на систему blankets [2]. Одновременно ППС относится к изделиям первого класса качества по классификации ИТЭР. При этом в соответствии с [3] все элементы ППС, формирующие вакуумную границу, относятся к классу VQC (Vacuum Quality Class) 1A, а элементы ППС, находящиеся в вакууме и не формирующие вакуумную границу, — к классу VQC 1B. Следует отметить, что в феврале 2013 г. ППС, как и все компоненты системы blankets, перестали классифицироваться как ядерное оборудование, работающее под давлением (декрет № 99-1046 от 13 декабря 1999 г.), и выведены из-под действия ESPN.

Согласно требованиям [2] АО «НИКИЭТ» совместно с АО «НИИЭФА» изготавливают и поставляют 179 ППС (рис. 1).

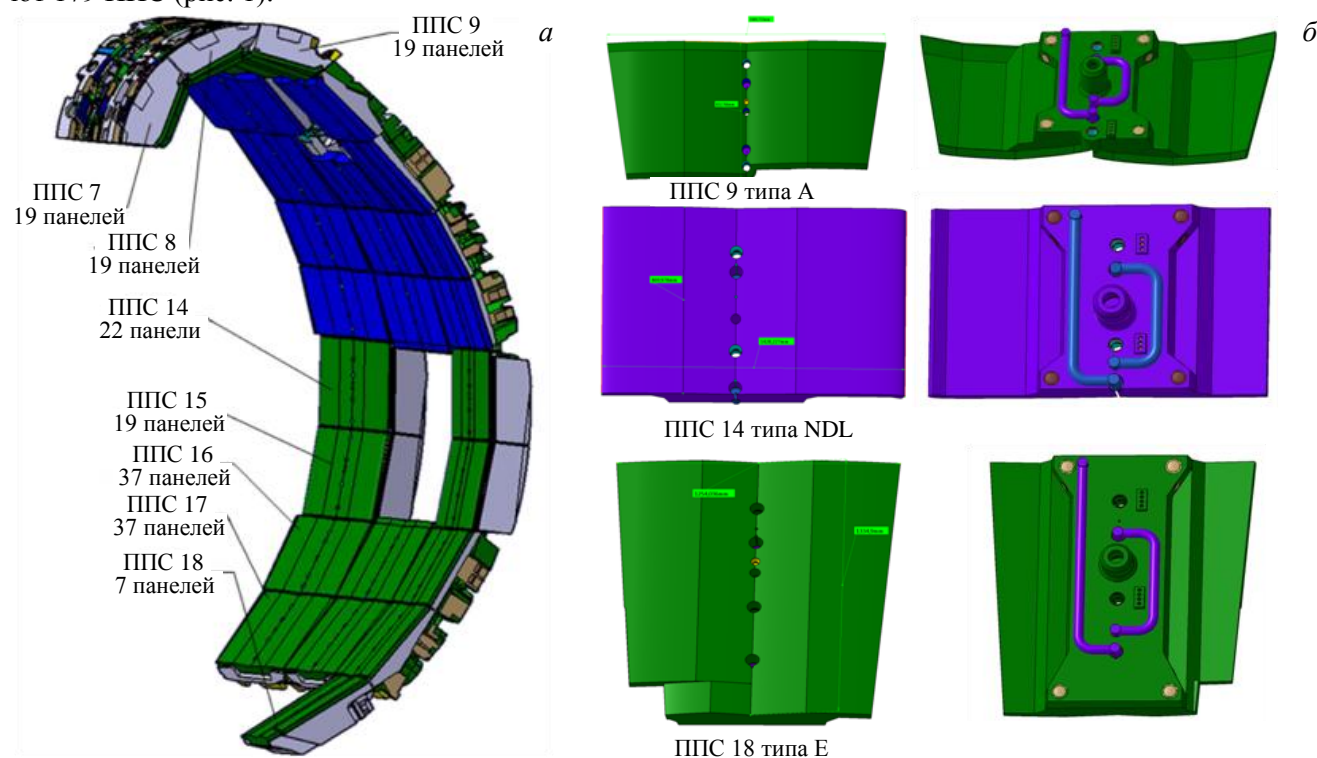


Рис. 1. Количество и расположение ППС (а), входящих в поставочный комплект, и общий вид ППС (б)

В соответствии с [4] предполагается 15 основных и 18 дополнительных вариантов исполнения ППС. Конструкции дополнительных вариантов исполнения ППС отличаются от основных наличием дополнительных технологических проходов и пазов для размещения диагностического оборудования.

В настоящее время специалисты АО «НИКИЭТ» участвуют в разработке следующих основных вариантов конструкции ППС: 7—9 типа А, 14 типа А, 1 типа NDL, 1 типа NE, 18 типа Е. Модели ППС 9 типа А, 14 типа NDL и 18 типа Е являются конфигурационными и показаны на рис. 1.

В июне 2014 г. МО ИТЭР утвердило конструкцию ППС 14 типа А в качестве квалификационного полномасштабного макета ППС, изготавливаемого на стадии «Квалификация технологических процессов».

Описание конструкции ППС. Каждая ППС является сборочной единицей, включающей теплонапряжённые компоненты, обращённые к плазме (пальцы ПС), несущую конструкцию первой стенки (НКПС), защитный тепловой экран (ЗТЭ), систему механического крепления (СК) ППС к ЗБ и систему электрической связи. Общий вид ППС типа 14 А представлен на рис. 2.

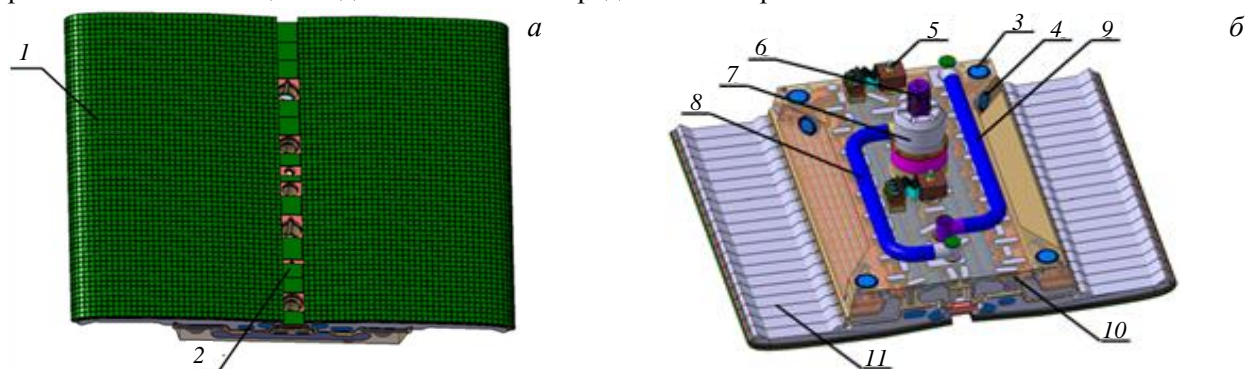


Рис. 2. ППС 14 типа А: *а* — вид со стороны плазмы; 1 — защитное покрытие; 2 — ЗТЭ; *б* — вид со стороны ЗБ; 3, 4 — полоидальные контактные электроизолирующие накладки (КЭИН); 5 — электрический соединитель (ЭС); 6 — болт СК; 7 — резьбовой стакан; 8, 9 — патрубок подвода и отвода теплоносителя соответственно; 10 — НКПС; 11 — пальцы ПС

АО «НИКИЭТ» осуществляет изготовление и поставку в АО «НИИЭФА» следующих компонентов для финальной сборки ППС: корпусов пальцев ПС, НКПС, СК ППС к ЗБ и системы электрической связи.

Корпуса пальцев ПС представлены на рис. 3. Каждый корпус пальца ПС включает заготовку корпуса и крышку обратного канала. Приварка крышки обратного канала к корпусу пальца выполняется электронно-лучевой сваркой (ЭЛС). Далее выполняется механическая обработка полученного полуфабриката с целью устранить влияние сварочных деформаций на размеры профиля под последующую приварку биметаллической крышки специалистами АО «НИИЭФА».

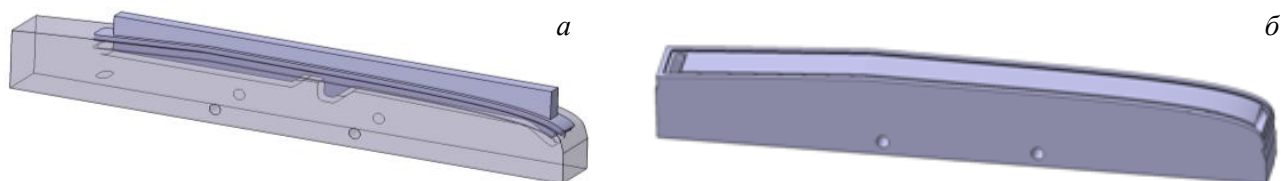


Рис. 3. Корпус пальца ППС: *а* — заготовка корпуса пальца под сварку; *б* — корпус пальца после механической обработки

НКПС — металлоконструкция с фасонной внешней конфигурацией имеет форму двутавра с наклонными полками (в терминологии МО ИТЭР — X-shape) с размещёнными внутри полоидальными и радиальными отверстиями, формирующими систему охлаждения. Конструкционный материал — сталь 316L(N)-IG в соответствии с [5]. Общий вид НКПС представлен на рис. 4.

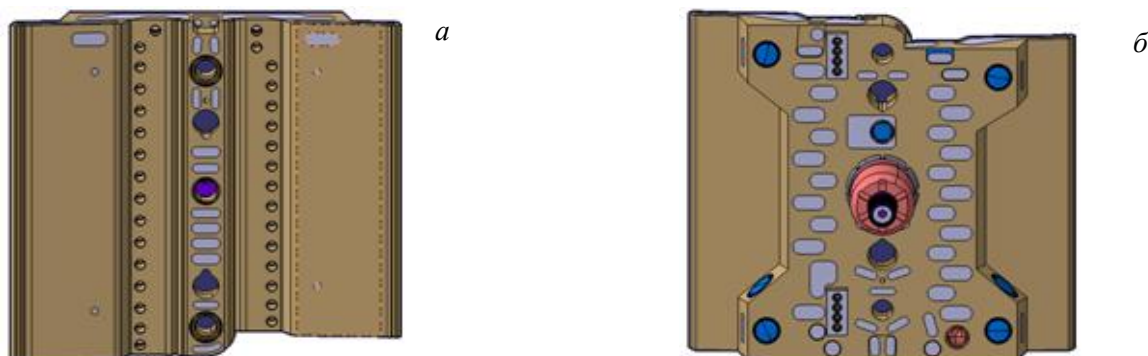


Рис. 4. Общий вид НКПС для ППС 9 типа А: *а* — вид со стороны плазмы; *б* — вид со стороны ЗБ

Полоидальные каналы системы охлаждения выполняются на специальном оборудовании для глубокого сверления. Максимальная глубина составляет 1335 мм для ППС 18 типа Е.

Для приварки крышек каналов охлаждения предполагается использование ЭЛС. Для минимизации поволодок после приварки крышек, герметизирующих тракт охлаждения, предусмотрена механическая обработка с целью обеспечить точность присоединительных размеров при финальной сборке ППС в АО «НИИЭФА».

СК ППС включает восемь КЭИН и резьбовой стакан с установленным центральным болтом и электроизоляционной и сферической шайбами (рис. 5).

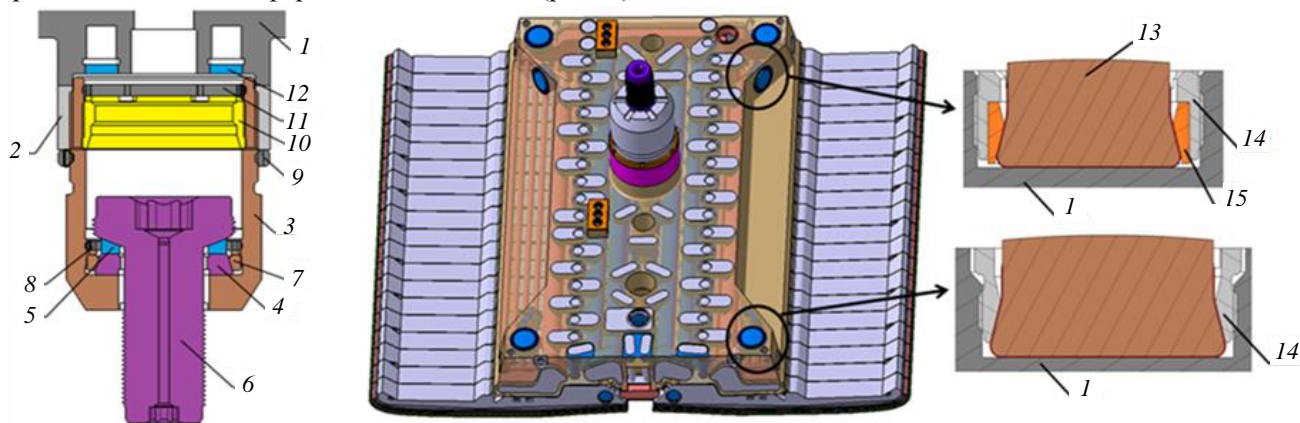


Рис. 5. СК ППС: 1 — НКПС; 2 — промежуточная обечайка; 3 — резьбовой стакан; 4 — электроизоляционная шайба; 5 — сферическая шайба; 6 — центральный болт; 7 — гайка электроизоляционной шайбы; 8 — стопорное кольцо; 9 — гайка шлицевая; 10 — парковочная гайка; 11 — стопорное кольцо; 12 — крышка канала охлаждения; 13 — КЭИН; 14 — фиксирующая гайка; 15 — коническая шайба

Полоидальные КЭИН размещены на наклонных поверхностях двутавровых полок НКПС и предназначены для восприятия радиального крутящего момента, при этом четыре радиальные КЭИН размещены на тыльной (обращённой к ЗБ) поверхности НКПС и предназначены для восприятия полоидального крутящего момента. Фиксация КЭИН в цилиндрическом пазе НКПС выполняется гайкой, изготовленной из стали марки 316L(N)-IG.

Для обеспечения электрической изоляции НКПС от ЗБ боковая коническая и тыльная поверхности КЭИН снабжены электроизоляционным покрытием (ЭИП), выполненным методом газотермического напыления [6]. В качестве конструкционного материала КЭИН используется алюминиевая бронза ($\text{CuAl}_{10}\text{Ni}_3\text{Fe}_4$) [7].

Механическое крепление ППС к ЗБ осуществляется центральным болтом М64×4, выполненным из стали Grade 660 [7]. Для упрощения процесса сборки центральный болт установлен в резьбовой стакан с внешней резьбой М145×4-ЛН. Резьбовой стакан, в свою очередь, вкручивается в промежуточную обечайку НКПС. Для компенсации неточностей сборки и предотвращения изгиба стержня болта под головкой центрального болта СК установлена шайба со сферической контактной поверхностью. Для электрической изоляции болта СК от НКПС в конструкцию введена дополнительная шайба с конической боковой поверхностью, на которую нанесено ЭИП.

Для обеспечения протекания тока при срывах плазмы от ППС к ЗБ в конструкции ППС предусмотрены специальные электрические шины — ЭС. Все остальные места возможного контакта ППС/ЗБ снабжены ЭИП. Данный подход позволяет уменьшить электромагнитные силы, действующие на элементы ППС при срывах плазмы [8]. Общий вид ЭС ППС представлен на рис. 6.

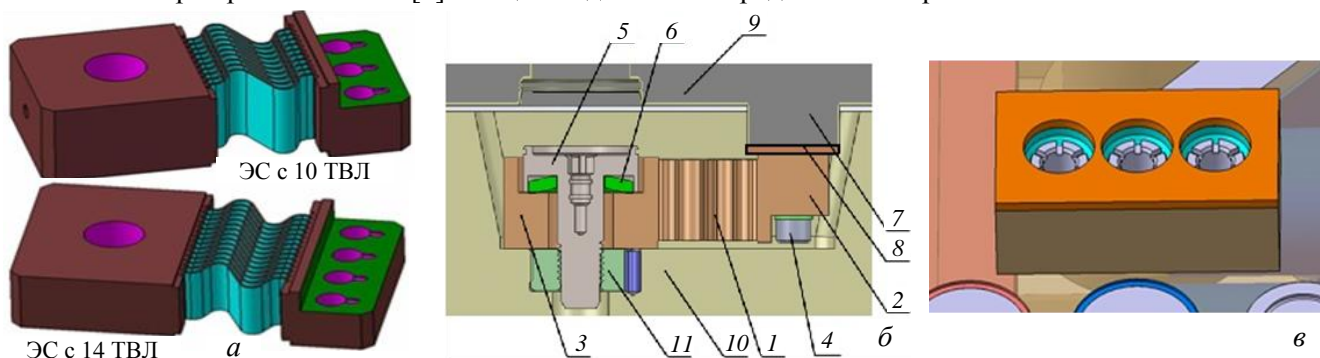


Рис. 6. Общий вид ЭС ППС (а); схема ЭС ППС (б): 1 — ЭС, 2 — боковой фланец ЭС, 3 — центральный фланец ЭС, 4 — винт М12, 5 — винт М24, 6 — тарельчатая пружина, 7 — стальной пьедестал, 8 — слой бронзы CuCrZr , 9 — НКПС, 10 — ЗБ, 11 — резьбовая втулка ЗБ; в — вид на биметаллический пьедестал ЭС

Конструктивно ЭС выполнен в виде моноблочной конструкции прямоугольной формы с волнообразными токоведущими ламелями (ТВЛ), расположенными в центральной части. Толщина ТВЛ составляет 1,2 мм при высоте 42 мм. Количество ТВЛ составляет 10 для ППС внешнего бланкета (значение тока может достигать 41,4 кА [9]) и 14 для ППС, расположенных в зоне верхнего свода вакуумной камеры (ВК) (значение тока достигает 210 кА [9]). Изготовление ТВЛ предполагается электроэрозионной обработкой. Общие габариты для ЭС с 10 ТВЛ составляют 168×75×46 мм и 168×100×46 мм для ЭС с 14 ТВЛ. Предполагается использование двух ЭС на интерфейсе ППС/ЗБ.

Крепление ЭС к ЗБ реализуется через центральный фланец винтом М24, боковой фланец ЭС крепится тремя винтами М12 к тыльной поверхности ППС. Тарельчатая пружина (см. рис. 6), расположенная под головкой винта центрального фланца ЭС, используется с целью сохранения силы предварительного затяга болта при термоциклическом нагружении. При установке центрального болта в ЭС предполагается зазор 0,4 мм между головкой болта и центральным фланцем ЭС. При затяжке болта силой 110 кН зазор закрывается, что позволяет организовать дополнительное охлаждение головки болта.

На интерфейсе ЭС/ППС на тыльной части НКПС выполнен биметаллический пьедестал высотой 28 мм, стальное основание которого выполнено фрезерованием, слой бронзы (3 мм) выполнен наплавкой. Данное требование к интерфейсу ЭС/ППС (контакт «бронза/бронза») продиктовано результатами электрических испытаний ЭС МБ/ВК (модуль бланкета/вакуумная камера).

Следует отметить, что на резьбу винтов ЭС и болта ППС нанесено уменьшающее трение покрытие на базе MoS_2 [10].

Отработка технологии изготовления компонентов ППС. Параллельно с разработкой конструкции ППС выполнялась отработка технологии изготовления её компонентов. Изготовлены следующие опытные макеты: корпуса пальцев ППС, полномасштабный макет НКПС для ППС 14 типа А, КЭИН с элементами крепления (на боковой и тыльной поверхностях КЭИН газотермическим методом нанесено ЭИП на базе Al_2O_3) и два комплекта резьбового стакана с центральным болтом и сферической и электроизоляционной шайбами и элементами крепления (рис. 7).

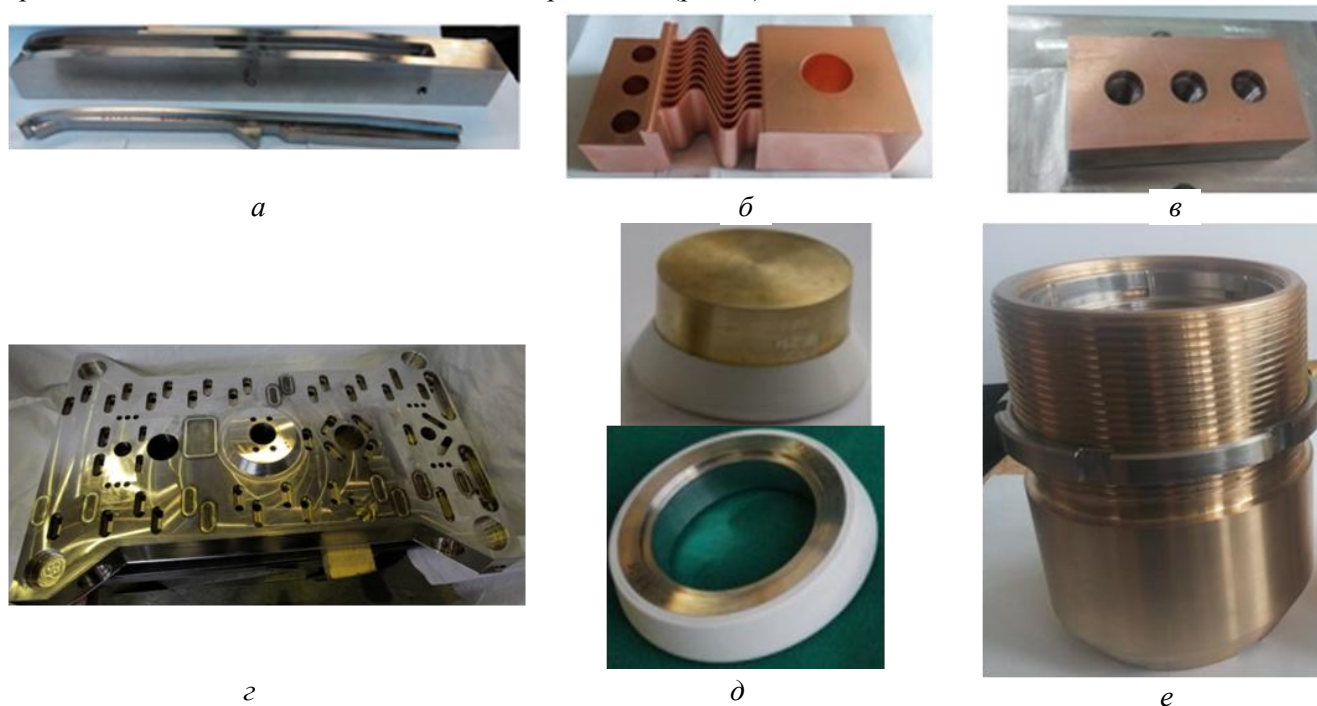


Рис. 7. Опытные макеты компонентов ППС: *a* — корпус пальца с крышкой обратного канала; *b* — ЭС; *в* — пьедестал ППС; *г* — НКПС; *д* — КЭИН, шайба с ЭИП; *е* — резьбовой стакан

Также изготовлены опытные макеты ЭС и биметаллических пьедесталов ЭС. В рамках подготовки пакета данных по сварке выполнена отработка технологии сварки образцов для толщин 6, 8, 10 и 12 (ЭЛС) и 15 мм (аргонодуговая сварка — АДС), имитирующих сварные соединения конструкции ППС.

Экспериментальное обоснование элементов системы крепления ППС. Для подтверждения работоспособности ЭИП, нанесённого на поверхность КЭИН, при действии нагрузок, характерных для

бланкета ИТЭР, выполнены испытания опытных образцов КЭИН с диаметром рабочей части 45 мм. Испытания проводились на воздухе при температуре 20 °С и относительной влажности не более 40%. Схема нагружения и КЭИН после испытаний представлены на рис. 8.

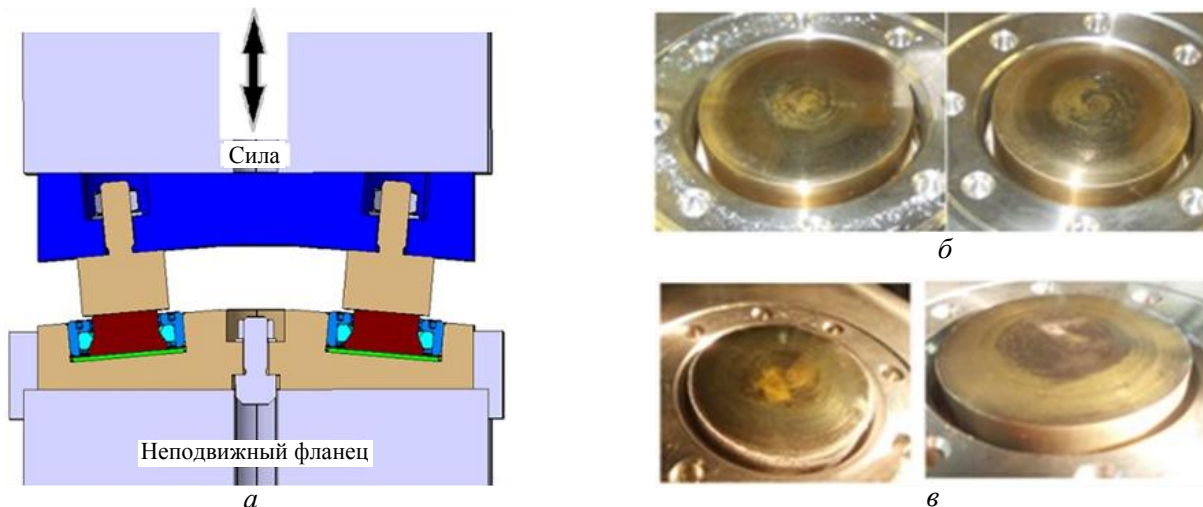


Рис. 8. Схема нагружения и КЭИН после испытаний (а), КЭИН № 10 и № 13 после испытаний (б), КЭИН № 1 и № 8 после испытаний (в)

В процессе испытаний выполнены 15 000 циклов с максимальной силой 450 кН на одну КЭИН, что соответствует номинальной нагрузке. Далее выполнены дополнительные 700 циклов с максимальной силой до 850 кН на одну КЭИН. По результатам испытаний КЭИН (ЭИП на конической боковой поверхности) подтверждена работоспособность ЭИП для всех режимов циклического нагружения, при этом на контактных (металлических) поверхностях КЭИН возникают продукты фреттинга, которые не влияют на электроизолирующие свойства покрытия. Следует отметить, что использование конической боковой поверхности позволяет уменьшить размеры паза под КЭИН в НКПС и обеспечить самопозиционирование КЭИН в указанном пазе.

Для экспериментального обоснования работоспособности центрального болта (резьба выполнена механической обработкой) была спроектирована и изготовлена испытательная оснастка, представленная на рис. 9.

На первом этапе проводились циклические механические испытания болта при нормальных условиях с использованием сервогидравлической испытательной машины Instron 8806. Нагружение осуществлялось осевой силой 600 кН/150 кН. Перед испытаниями на все резьбовые соединения было нанесено антисхватывающее покрытие DRY MOLY PASTE фирма ROCOL (Великобритания) на основе MoS₂ для облегчения последующей разборки.

При испытаниях не зафиксировано самопроизвольного откручивания болта. Повреждений и разрушений объекта испытаний и оснастки не выявлено, реализовано 15 000 циклов нагружения. Диаграмма «нагрузка-перемещение» представлена на рис. 9.

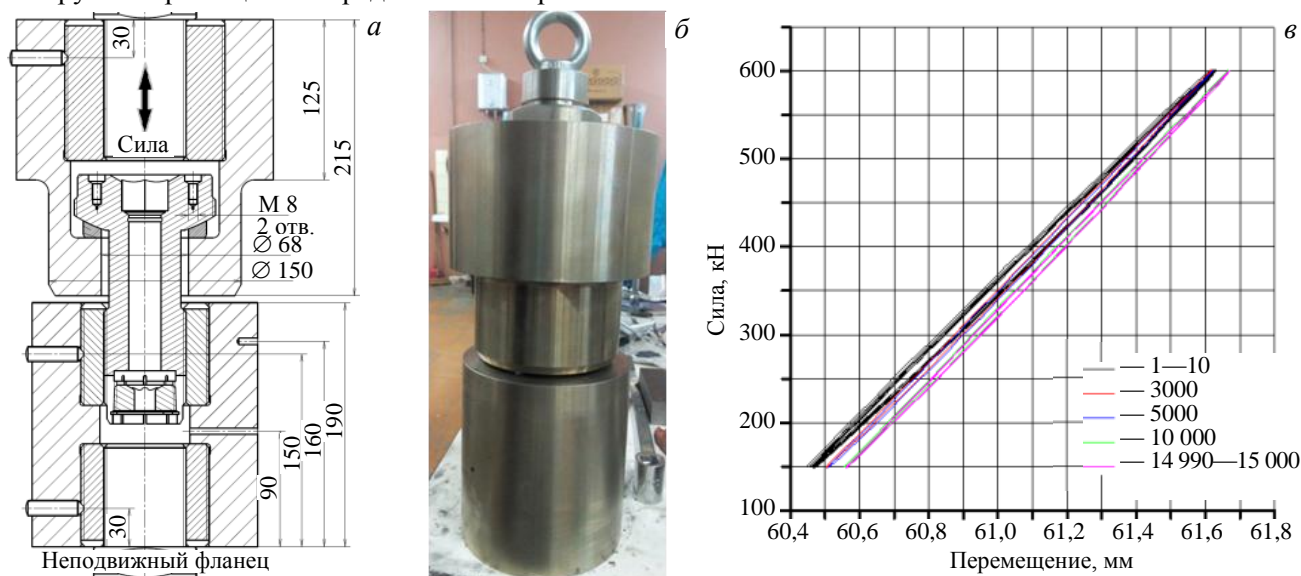


Рис. 9. Схема нагружения болта (а), испытательная оснастка в сборе (б), диаграммы «нагрузка-перемещение» (в)

Далее были проведены циклические механические испытания болта при температуре 270 °С на сервогидравлической испытательной машине Instron 8802, оснащённой термокамерой. Нагружение осуществлялось осевой силой 250 кН/50 кН. На рис. 10 показаны диаграммы изменения температуры в пространстве термокамеры и на испытуемом объекте и диаграмма «нагрузка-перемещение». При испытаниях также не обнаружено самопроизвольного откручивания болта. Повреждений и разрушений объекта испытаний и оснастки не выявлено.

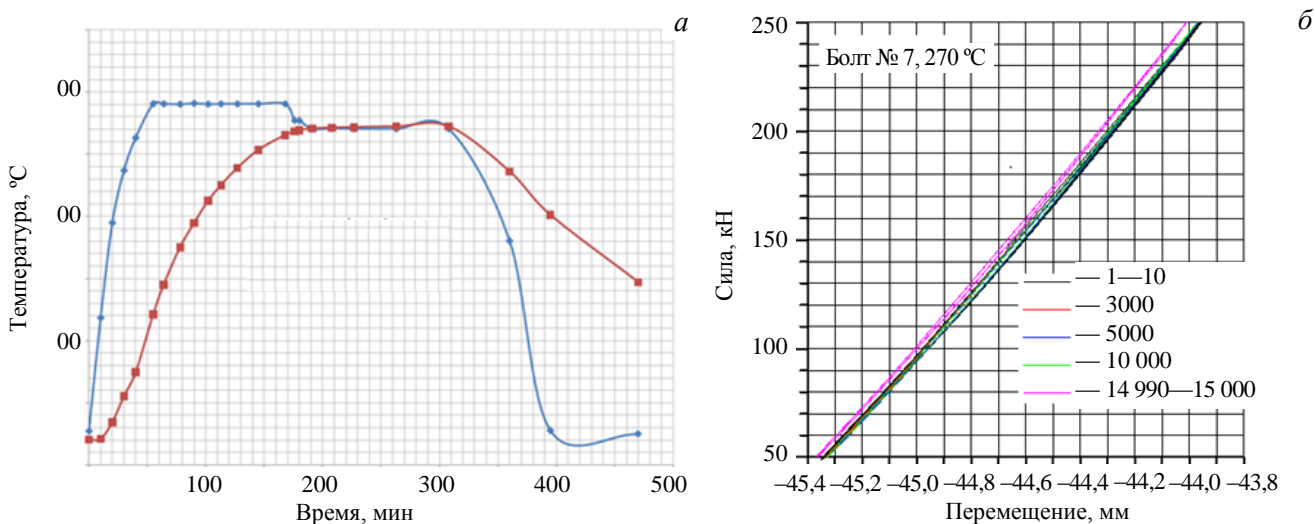


Рис. 10. Циклические механические испытания болта при температуре 270 °С: *а* — температурные диаграммы при испытаниях: ■ — в термокамере, ● — в образце; *б* — диаграммы «нагрузка-перемещение»

Также были проведены термовакуумные испытания опытных образцов КЭИН. Накладки были закреплены в оснастке, разработанной для механических циклических испытаний (рис. 11). После проведения 24 циклов термического нагружения в вакууме электроизоляционные свойства опытных образцов КЭИН сохранились.

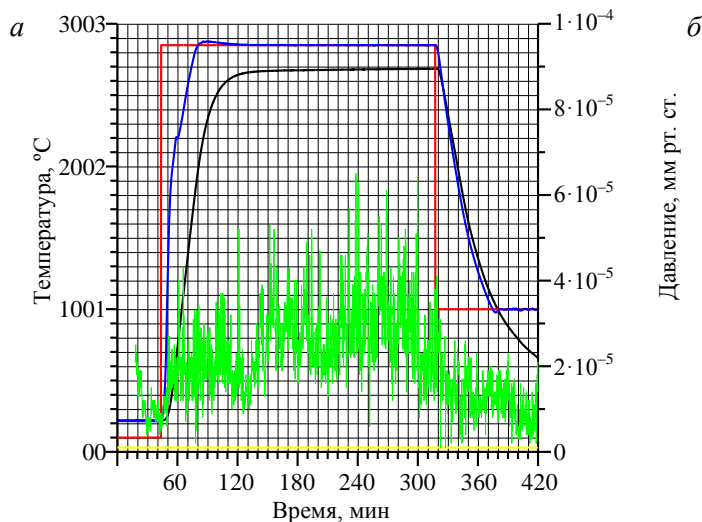


Рис. 11. Термовакуумные испытания КЭИН: *а* — объекты испытаний на термоплите вакуумной камеры; *б* — типовая диаграмма термовакуумных испытаний: — температура на плите; — заданная температура; — температура внизу плиты; — заданное давление; — измеренное давление

Проведённые термовакуумные испытания опытных образцов контактных электроизолирующих накладок продемонстрировали отсутствие растрескивания ЭИП и сохранение его электроизоляционных свойств.

РАБОТЫ АО «НИКИЭТ» В РАМКАХ СОГЛАШЕНИЯ О ПОСТАВКЕ СМБ

СМБ являются частью системы бланкета ИТЭР и выполняют следующие функции:

- крепление МБ на внутренней стенке ВК;
- электрическая изоляция МБ от ВК в местах возможного контакта;

- заземление объёмных и поверхностных токов, наведённых в МБ на ВК;
- восприятие термоциклических и вызванных срывами плазмы нагрузок от веса МБ.

СМБ являются компонентами, не влияющими на радиационную защиту реактора (non-PIС). Одновременно СМБ относятся к изделию первого класса качества по классификации ИТЭР. При этом в соответствии с [3] все элементы СМБ относятся к классу VQC 1В (компоненты, находящиеся в вакууме).

В соответствии с [1] Проектный центр ИТЭР является ответственным за поставку СМБ для 440 МБ. В поставочный комплект входят следующие компоненты и сборки:

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

В качестве полномасштабных макетов СМБ, изготавливаемых на стадии квалификации технологических процессов, выбраны следующие компоненты:

- две сборки ГМО МБ, расположенного в зоне внутреннего бланкета;
- два комплекта КЭИН полоидальных межмодульных ключей с элементами крепления (4 шт.);
- два комплекта КЭИН ключей ВК с элементами крепления (4 шт.);
- два комплекта КЭИН стандартных центрирующих ключей с элементами крепления (4 шт.);
- два комплекта КЭИН межмодульных центрирующих ключей с элементами крепления (4 шт.);
- два комплекта КЭИН МБ 15 с элементами крепления (4 шт.);
- два комплекта ЭС с 14 ТВЛ (4 шт.).

Описание конструкции. ГМО устанавливаются на тыльной поверхности ЗБ и используются для крепления МБ на внутренней стенке ВК. Каждый МБ использует четыре сборки ГМО. Общий вид ГМО представлен на рис. 12. Конструкция ГМО позволяет закрепить МБ на внутренней стенке ВК, при этом компенсируя тепловое расширение МБ. Крепление ГМО на ВК выполнено в виде резьбового соединения. При установке МБ болт вкручивается в коническую втулку. Стопорение резьбового соединения «болт/коническая гайка» предполагается с использованием технологии Selflock®. Для исключения схватывания в резьбовом соединении «болт/коническая гайка» в конструкцию введено антисхватывающее/уменьшающее трение покрытие на базе MoS₂ [10].

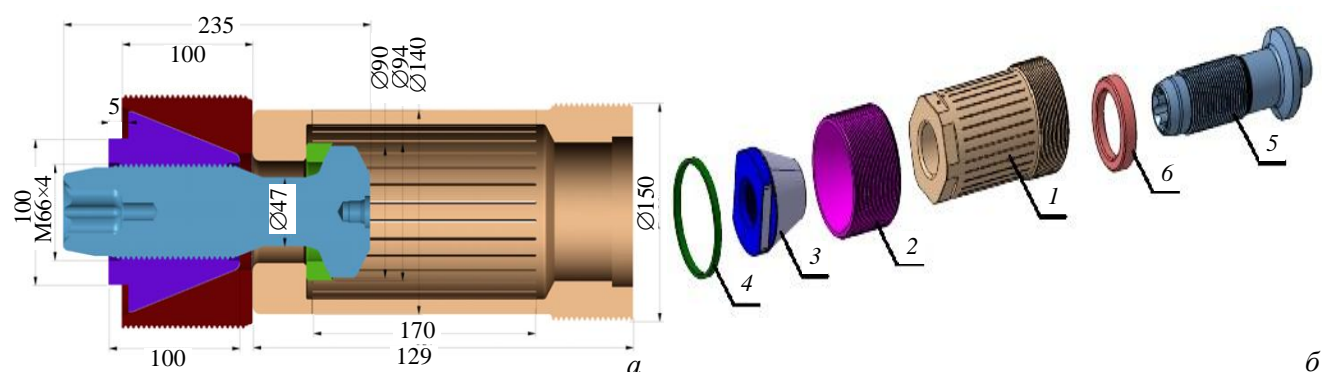


Рис. 12. Общий вид ГМО в сборе (а) и схема ГМО (б): 1 — гибкий картридж; 2 — коническая втулка; 3 — коническая гайка; 4 — проставка; 5 — болт М64; 6 — сферическая шайба

Для обеспечения электрической изоляции на внешнюю поверхность конической гайки и торец конической втулки газотермическим способом нанесено ЭИП на основе Al₂O₃ [6].

Конструкционный материал гибкого картриджа, сферической шайбы и конической гайки — сплав Alloy 718. Сталь марки Grade 660 используется в качестве конструкционного материала болта, коническая гайка выполнена из алюминиевой бронзы.

Для восприятия усилий от радиальных, полоидальных и тороидальных моментов, действующих на МБ при срывах плазмы, в конструкцию МБ введены КЭИН. Общий вид КЭИН различных вариантов исполнения с элементами крепления представлен на рис. 13.

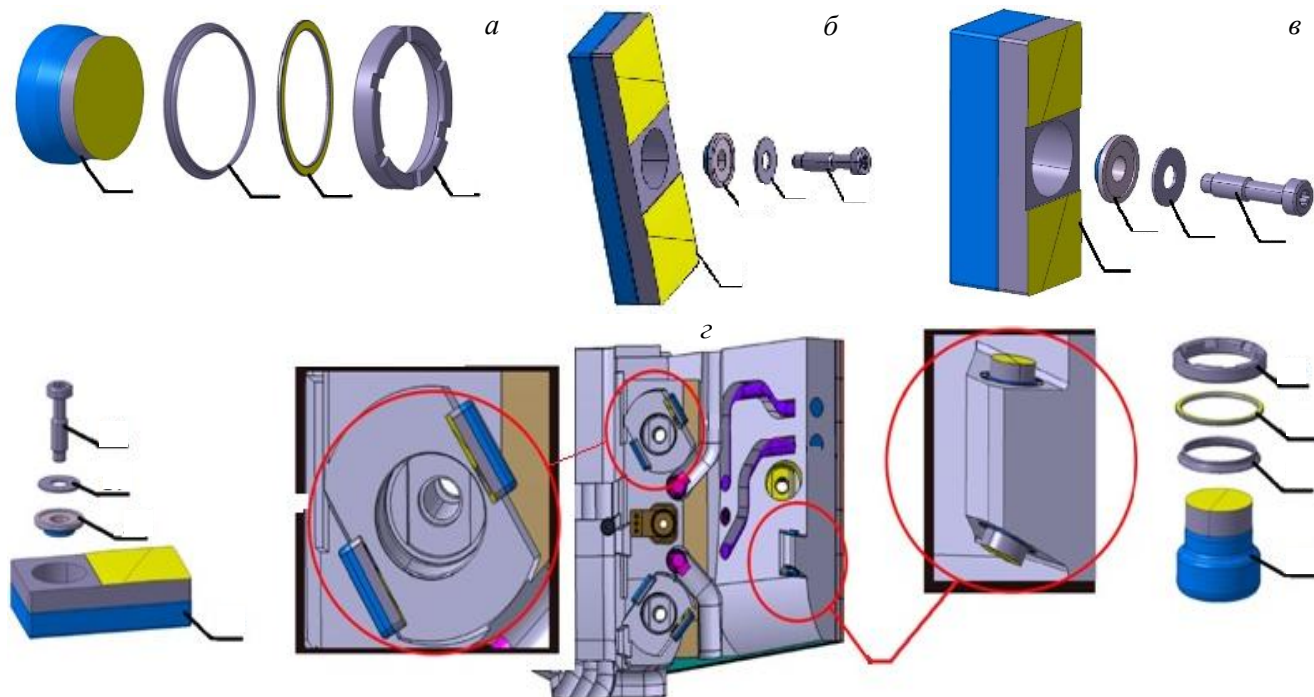


Рис. 13. КЭИН межмодульного полоидального ключа (а): 1 — цилиндрическая КЭИН, 2 — гибкий элемент, 3 — шайба с ЭИП, 4 — резьбовое кольцо; КЭИН ключа ВК (б): 5 — призматическая КЭИН, 6 — шайба с ЭИП, 7 — дисковая пружина, 8 — болт М12×1,75; КЭИН стандартного центрирующего ключа (в): 9 — призматическая КЭИН центрирующего ключа, 10 — шайба с ЭИП, 11 — дисковая пружина, 12 — болт; общий вид КЭИН МБ 15 (г): 13 — болт М12×1,75, 14 — дисковая пружина, 15 — шайба с ЭИП, 16 — призматическая КЭИН, 17 — цилиндрическая КЭИН, 18 — гибкий элемент, 19 — шайба с ЭИП, 20 — резьбовое кольцо

В качестве конструкционного материала КЭИН используется алюминиевая бронза. Для обеспечения электрической изоляции ЗБ от ВК боковая и тыльная поверхности КЭИН снабжены ЭИП на основе Al_2O_3 . Для уменьшения сдвиговых сил, действующих на контактные поверхности КЭИН, 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 (см. рис. 13).

Для заземления токов, наведённых в МБ при срывах плазмы, каждый МБ снабжён двумя ЭС на интерфейсе МБ/ВК. ЭС представляет собой центральный и боковой фланцы, соединённые с помощью группы волнообразных ТВЛ (рис. 14). В поставочный комплект СМБ входят два типа ЭС: с 10 ТВЛ и с 14 ТВЛ.

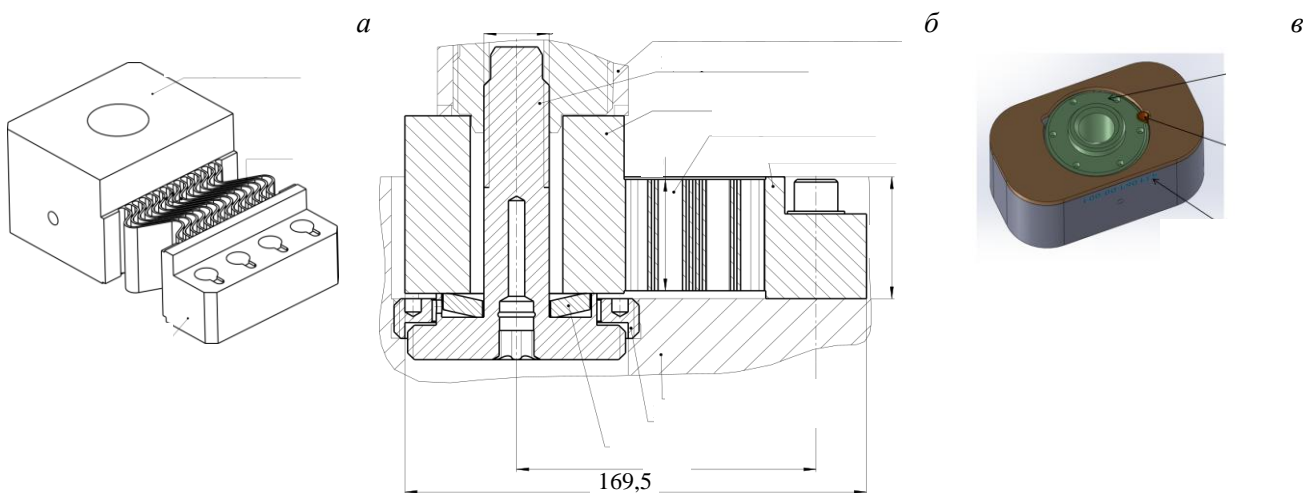


Рис. 14. Общий вид ЭС МБ/ВК (а); общий вид пьедестала ЭС (б); ЭС с элементами крепления (в)

Со стороны ВК выполнен биметаллический пьедестал (см. рис. 14), крепление которого к внутренней стенке ВК реализуется АДС. Изготовление биметаллического пьедестала предполагается с использованием технологии горячего изостатического прессования (ГИП).

Следует отметить, что процедура сборки внутрикамерных компонентов предполагает доработку по месту картриджей ГМО, КЭИН и центрального фланца ЭС. Данное решение продиктовано необходимостью компенсировать поводки корпуса ВК после сварки и отклонениями при изготовлении ЗБ.

Данный подход МО ИТЭР предполагает изготовление СМБ в два этапа. На первом этапе изготавливаются полуфабрикаты картриджей ГМО, КЭИН и ЭС. Далее изготовленные полуфабрикаты поставляются на площадку для проведения измерения полученной геометрии ВК. Результаты измерений и полуфабрикаты СМБ передаются в АО «НИКИЭТ», где выполняются доработка изделий, очистка и упаковка.

Отработка технологии изготовления компонентов СМБ. В рамках соглашения о поставке СМБ выполнялась отработка технологии изготовления СМБ. Опытные макеты ГМО, КЭИН, ЭС и биметаллических пьедесталов представлены на рис. 15.

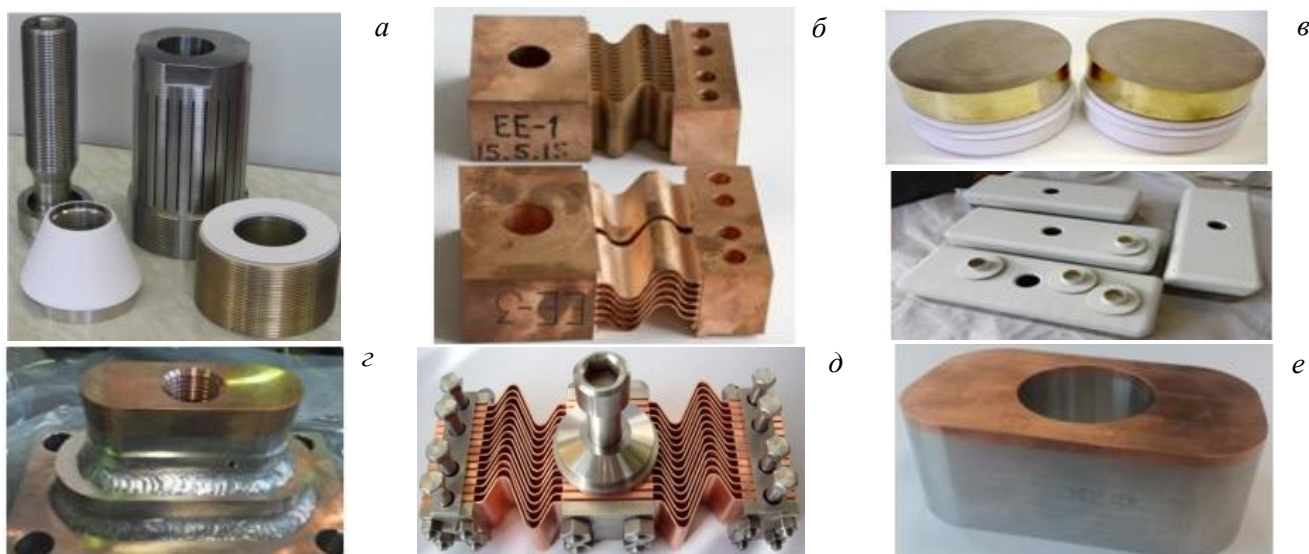


Рис. 15. Опытные макеты ГМО: *а* — ГМО; *б* — ЭС, ТВЛ выполнены электроэрозионной обработкой; *в* — КЭИН; *г* — биметаллическое соединение, выполненное сваркой взрывом; *д* — ЭС с механическим креплением ТВЛ; *е* — биметаллическое соединение, выполненное горячим изостатическим прессованием

Экспериментальное обоснование работоспособности элементов СМБ. В рамках экспериментального исследования работоспособности ГМО выполнены механические циклические испытания ГМО внутреннего бланкета на сервогидравлической машине Instron 8806. В соответствии с [1] прикладывалась циклическая сила ± 800 кН, боковое смещение фланца ГМО до 3 мм и наклон фланца ГМО на 3 град.

По результатам испытаний показано, что конструкция ГМО обеспечивает 20-кратный запас по числу циклов при статическом циклическом нагружении, 2-кратный запас по перемещениям и 1,5-кратный запас по максимальной силе, при этом отсутствует повреждение ЭИП.

После выполнения испытаний на специфицированные нагрузки выполнено испытание ГМО до разрушения (рис. 16).

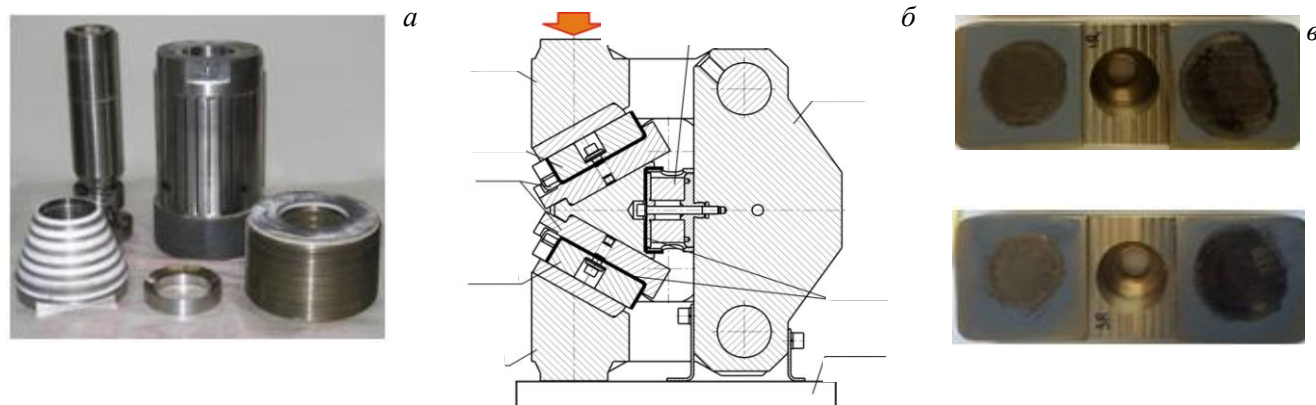


Рис. 16. Механические циклические испытания ГМО и КЭИН: *а* — опытный макет ГМО после испытаний; *б* — схема оснастки для испытания КЭИН; *в* — КЭИН после 400 циклов нагружения силой 1000 кН

Проведены испытания призматических КЭИН с разными радиусами сферической поверхности (500 и 1000 мм). Схема испытаний и испытательная оснастка представлены на рис. 16. Нагружение проводилось силой 1000 и 1400 кН, соответствующей категориям нагружения II и III соответственно согласно [11]. Количество циклов нагружения принято равным 400 для силы 1000 кН и 1 для силы 1400 кН.

По результатам испытаний продемонстрировано сохранение целостности ЭИП на опытных макетах КЭИН, растрескивания, выкрашивания и осыпания ЭИП не зафиксировано. Отмечено уменьшение толщины КЭИН для обоих вариантов исполнения радиуса сферической поверхности (500 и 1000 мм) на 0,2 мм.

Использование КЭИН с радиусом контактной поверхности 500 и 1000 мм приводит к появлению остаточных деформаций в накладках и ключах ВК и, как следствие, к увеличению зазоров между накладками и ключами, что может стать причиной увеличения динамических усилий, действующих на МБ при срывах плазмы.

Для исследования работоспособности ЭС МБ/ВК проведены механические циклические и электрические испытания. Механические испытания проводились на сервогидравлической испытательной машине Instron 8802. Во время испытаний электрический соединитель устанавливается на специальную оснастку, позволяющую разложить вертикальное перемещение штока испытательной машины на смещение фланцев ЭС по трём направлениям (рис. 17). Испытания проведены при комнатной температуре и влажности воздуха 35%. На первом этапе испытаний выполнялось первоначальное смещение на 1,7 мм, далее выполнялись 8000 циклов с амплитудой перемещения $\pm 0,6$ мм и 22 000 циклов с амплитудой перемещения $\pm 0,4$ мм. ЭС МБ/ВК, прошедший первый этап испытаний, представлен на рис. 17, повреждения и трещины не зафиксированы.

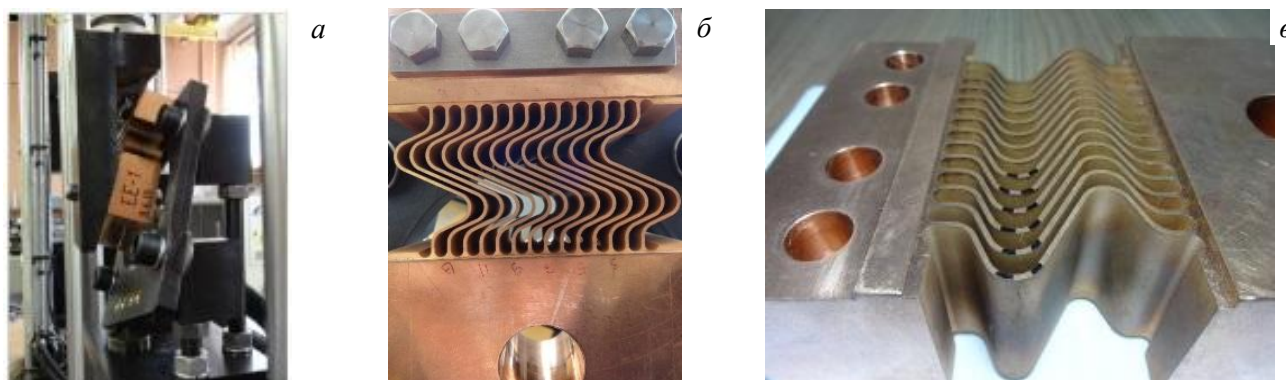


Рис. 17. Механические испытания ЭС МБ/ВК: *а* — испытательная оснастка с установленным ЭС МБ/ВК; *б* — после первого этапа испытаний; *в* — после второго этапа испытаний

На этапе 2 амплитуда циклических перемещений образца была увеличена. При значениях амплитуды циклических перемещений $\pm 1,1$ — $\pm 1,7$ мм разрушения ламелей не зафиксировано. При значении циклического смещения $\pm 1,8$ мм было зафиксировано появление трещин. На 1860-м цикле нагружения зафиксирован первый щелчок, после прохождения следующих 2000 циклов были обнаружены трещины на гibaх ламелей.

По результатам испытаний механическая циклическая прочность образца ЭС, изготовленного методом электроэрозионной обработки, обеспечивается с 20-кратным запасом по числу циклов нагружения, соответствующего режиму Fast VDE II, и 2-кратным запасом по амплитуде перемещений, соответствующей режиму Inductive I.

Электрические испытания выполнены для конструкции ЭС МБ/ВК с механической фиксацией ТВЛ. В ходе испытаний выполнялось пропускание импульсных токов с максимальным действующим значением 137 кА продолжительностью 300 мс [12]. Испытание проводилось для двух вариантов контакта ЭС/оснастка: «сталь—бронза» и «сталь—сталь».

На первом этапе проведено шесть опытов с последовательно нарастающим действующим значением тока от 37 до 137 кА длительностью 0,3 с. Максимальная температура образцов, зафиксированная тепловизором в конце опыта, составила 200 °С на боковом фланце (контакт «бронза—сталь»).

По результатам первого этапа отмечены следы пригорания в области контакта «бронза—сталь» (рис. 18), ослабления затяга болтов и шпилек не зафиксировано. Разрушения ТВЛ либо образования трещин также не зафиксировано.

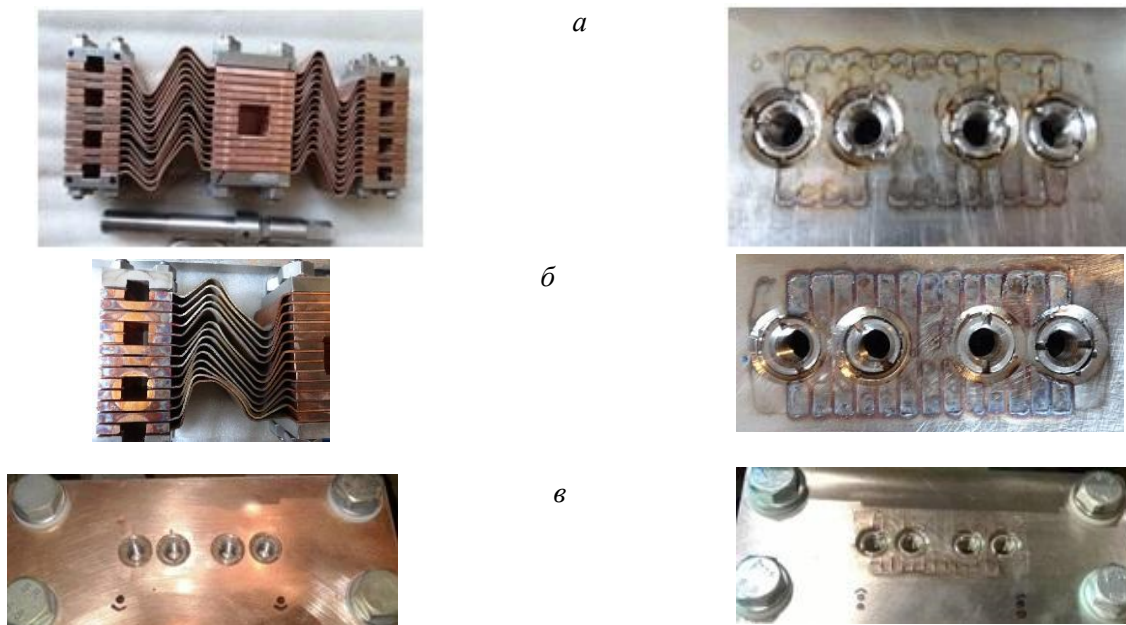


Рис. 18. ЭС МБ/ВК после электрических испытаний: *а, б, в* — этапы 1, 2, 3 соответственно

На втором этапе выполнено десять зачётных опытов при максимальном токе 137 кА длительностью 0,3 с. Максимальная температура была зафиксирована на боковых фланцах ЭС (контакт «бронза—сталь») и составила 267 °С. Контакт «бронза—сталь» под боковым фланцем имеет ярко выраженные следы подгорания с образованием остаточных пластических деформаций глубиной до 0,5 мм на стальной контактной поверхности (см. рис. 18). Ламели искривлены и касаются друг друга, одна внешняя ТВЛ разорвана.

На третьем этапе испытаний проведено три зачётных опыта при максимальном токе 45 кА длительностью 1,4 с. Момент начального затяга винта центрального фланца 360^{+45} Нм, боковых фланцев — 56^{+5} Нм. После первого зачётного опыта затяг винтов бокового фланца снижают до 40^{+5} Нм, после второго зачётного опыта — до 30^{+5} Нм. Визуальный осмотр образцов после опытов 1 и 2 не зафиксировал следов подгорания, изменение цвета стали и бронзы и т.п. При снижении момента затяга до 30 Нм при прохождении тока 45 кА в течение 1,4 с зафиксировано яркое свечение в зоне бокового блока с контактом «бронза—сталь».

По результатам электрических испытаний разрушение ТВЛ зафиксировано лишь после 10 импульсов с максимальным током 137 кА. Данное значение тока соответствует категории III, при этом требуемое количество циклов нагружения 1. Таким образом, электрические испытания подтвердили работоспособность ЭС в условиях нагружения, максимально приближенных к условиям работы бланкета ИТЭР. Необходимо обеспечить контакт «бронза—бронза» на интерфейсе ЭС с ППС и ЗБ с целью исключения подгорания контактов и пластических деформаций на интерфейсе ППС/ЭС/ЗБ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках реализации соглашений о поставке ППС и СМБ АО «НИКИЭТ» разработало и утвердило в МО ИТЭР план качества основного поставщика внутрикамерных компонентов ИТЭР.

Разработанные специалистами АО «НИКИЭТ» конструкции ЭС и СК ППС утверждены МО ИТЭР и используются в качестве базовых для остальных компонентов системы бланкета.

Проведённые экспериментальные исследования подтвердили работоспособность компонентов ППС и СМБ в условиях, максимально приближенных к условиям работы бланкета ИТЭР.

Выполнена отработка технологии изготовления основных компонентов ППС и СМБ.
Изготовлены опытные макеты основных узлов ППС и СМБ.

REFERENCES

1. **IO ITER.** Technical Specification. Annex B to Procurement Arrangement 1.6.P3.RF.01, ITER_UID_PUKQPB vol. 1.1, 2014.
2. **IO ITER.** Technical Specification. Annex B to Procurement Arrangement 1.6.P1A.RF.01, ITER_D_GHVBGL, vol. 1.1, 2014.
3. **IO ITER.** ITER Vacuum Handbook. ITER D 2EZ9UM, 2009.
4. **IO ITER.** List of EHF FW Variants for RF PA. GLDCSS, vol. 2.2.
5. **IO ITER.** Material Specification «316L(N)-IG ESR or VAR Forging for Blanket». G2VF8B, vol. 1.2.
6. **IO ITER.** Technical Specification «Insulating Coatings for the Blanket System Components». D25QF6, vol. 1.4.
7. **Barabash V.** Materials challenges for ITER — current status and future activities. — J. of Nuclear Materials, 2007, vol. 367—370, pp. 21—32.
8. **Rozov V., Belyakov V., Kukhtin V., Lamzin E., Mazul I., Sytchevsky S.** Strategy for solving a coupled problem of the electromagnetic load analysis and design optimization for local conducting structures to support the ITER blanket development. — FED, 2014, vol. 89, pp. 2691—2708.
9. **IO ITER.** ITER Vacuum Vessel Load Specification. ITER D 2F52JY, vol. 3.3, 2014.
10. **IO ITER.** Technical Specification «Low Friction Antiseize Coating for Blanket Components». GKEM64, vol. 2.1.
11. **ITER IO.** Blanket System Load Specification. ITER_D_3NSGK2 vol. 2.1.
12. **Ioki K.** Progress on design and R&D of ITER FW/blanket. — FED, 2002, vol. 61—62.

AUTHORS

Dragunov Yu.G. Joint Stock Company «N.A. Dollezhal Research and Development Institute of Power Engineering» (JSC «NIKIET»), ul. M. Krasnosel'skaya 2/8, 107140 Moscow, Russia; yury.dragunov@nikiet.ru

Leshukov A.Yu. Joint Stock Company «N.A. Dollezhal Research and Development Institute of Power Engineering» (JSC «NIKIET»), ul. M. Krasnosel'skaya 2/8, 107140 Moscow, Russia; leshu@nikiet.ru

Strebkov Yu.S. Joint Stock Company «N.A. Dollezhal Research and Development Institute of Power Engineering» (JSC «NIKIET»), ul. M. Krasnosel'skaya 2/8, 107140 Moscow, Russia; styri@nikiet.ru

Kirillov S.Yu. Joint Stock Company «N.A. Dollezhal Research and Development Institute of Power Engineering» (JSC «NIKIET»), ul. M. Krasnosel'skaya 2/8, 107140 Moscow, Russia; kirillov@nikiet.ru

Makarov S.V. Joint Stock Company «N.A. Dollezhal Research and Development Institute of Power Engineering» (JSC «NIKIET»), ul. M. Krasnosel'skaya 2/8, 107140 Moscow, Russia; msv@nikiet.ru

Trofimovich P.D. Joint Stock Company «N.A. Dollezhal Research and Development Institute of Power Engineering» (JSC «NIKIET»), ul. M. Krasnosel'skaya 2/8, 107140 Moscow, Russia; trofimovich@nikiet.ru

Yolkin V.N. Joint Stock Company «N.A. Dollezhal Research and Development Institute of Power Engineering» (JSC «NIKIET»), ul. M. Krasnosel'skaya 2/8, 107140 Moscow, Russia; v.elkin@nikiet.ru

Sviridenko M.N. Joint Stock Company «N.A. Dollezhal Research and Development Institute of Power Engineering» (JSC «NIKIET»), ul. M. Krasnosel'skaya 2/8, 107140 Moscow, Russia; sviridenko@nikiet.ru

Razmerov A.V. Joint Stock Company «N.A. Dollezhal Research and Development Institute of Power Engineering» (JSC «NIKIET»), ul. M. Krasnosel'skaya 2/8, 107140 Moscow, Russia; razmerov@nikiet.ru

Parshutin E.V. Joint Stock Company «N.A. Dollezhal Research and Development Institute of Power Engineering» (JSC «NIKIET»), ul. M. Krasnosel'skaya 2/8, 107140 Moscow, Russia; parshutin@nikiet.ru

Khomyakov S.E. Joint Stock Company «N.A. Dollezhal Research and Development Institute of Power Engineering» (JSC «NIKIET»), ul. M. Krasnosel'skaya 2/8, 107140 Moscow, Russia; hom@nikiet.ru

Kolganov V.Yu. Joint Stock Company «N.A. Dollezhal Research and Development Institute of Power Engineering» (JSC «NIKIET»), ul. M. Krasnosel'skaya 2/8, 107140 Moscow, Russia; wlk@nikiet.ru

Safronov V.M. Institution «Project Center ITER», pl. Akademika Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia; v.safronov@iterrf.ru

Putrik A.B. Institution «Project Center ITER», pl. Akademika Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia; putrik@triniti.ru

Received 19 September 2016
Problems of Atomic Science and Technology
Ser. Thermonuclear Fusion, 2016, vol. 39, issue 4, pp. 13—26.