

АО «НИКИЭТ» — 75 лет

УДК 621.039.63

РАЗРАБОТКА И СОЗДАНИЕ ВНУТРИКОРПУСНЫХ УСТРОЙСТВ ИТЭР

Каплиенко А.В., Стребков Ю.С., Данилов И.В., Коростелев А.Б., Соловьев О.В.,
Свириденко М.Н., Поддубный И.И. (АО «НИКИЭТ», г. Москва)

e-mail: styri@nikiet.ru

ИТЭР — уникальный международный проект, который должен стать моделью будущих энергетических термоядерных реакторов и рассматривается как важнейшая ступень перед созданием демонстрационной термоядерной электростанции [1]. В его разработке и сооружении участвуют Европейский Союз, Россия, Китай, Южная Корея, Индия, Япония и США [2]. Основное участие сторон на современном этапе заключается в изготовлении, испытании и поставке на площадку Международной организации ИТЭР высокотехнологичного оборудования с соблюдением не только законодательных и регулирующих документов Франции, где строится ИТЭР, но и национальных законодательных актов стран-поставщиков.

Задачи АО «НИКИЭТ» в рамках проекта ИТЭР — разработка и испытания полномасштабных прототипов, отработка технологии изготовления и поставка компонентов панелей первой стенки и соединителей модулей бланкета в рамках соглашений о поставках.

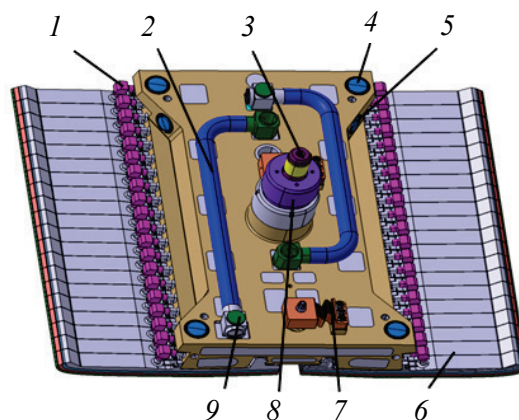
АО «НИКИЭТ» является 100%-ным поставщиком соединителей модулей бланкета. Одновременно оно принимает участие в изготовлении и поставке 40% панелей первой стенки совместно с АО «НИИЭФА» [3].

В статье отражен опыт освоения инновационных методов конструирования элементов бланкета ИТЭР, представлены результаты НИОКР в обоснование конструкторско-технологических решений поставочных изделий.

Защитный бланкет реактора ИТЭР. Поставочные изделия входят в состав системы бланкета реактора ИТЭР, состоящей из 440 модулей [4]. Каждый из них включает защитный блок и панель первой стенки, соединенные между собой механически, электрически и гидравлически. Панель первой стенки является об-

ращенным к плазме теплонапряженным компонентом, воспринимающим тепловой поток до $4,7 \text{ МВт/м}^2$ и механически закрепленным на защитном блоке. В поставочный комплект входят по 15 основных и дополнительных вариантов исполнения панелей первой стенки, отличающихся наличием дополнительных технологических проходов и пазов под размещение диагностического оборудования [3] (рис. 1). В свою очередь, каждая панель первой стенки является сборочной единицей, включающей обращенные к плазме теплонапряженные компоненты — пальцы панели, несущую конструкцию первой стенки, систему крепления к защитному блоку и систему электрической связи.

Защитный блок крепится к вакуумной камере с помощью гибких опор, входящих в состав системы соединителей модулей бланкета [5]. В состав последней также входят контактные электроизолирующие накладки и электрические



Р и с. 1. Общий вид панели первой стенки: 1 — центральный болт первой стенки; 2 — резьбовой стакан; 3 — патрубок отвода теплоносителя; 4 — переходник; 5, 6 — пологидальная и радиальная контактная электроизолирующая накладка соответственно; 7 — выход теплоносителя; 8 — электрический соединитель; 9 — энергонапряженные компоненты

соединители. Функциями системы соединителей модулей бланкета являются фиксация защитного блока на вакуумной камере и создание электрической связи между ними.

Система менеджмента качества и инновационные методы конструирования. Участие в проекте ИТЭРа потребовало от АО «НИКИЭТ» выполнения требований, определяющих разработку, изготовление и испытания компонентов с точки зрения качества изделий. В соответствии с требованием Международной организации ИТЭР каждый поставщик изделий должен иметь внедренную систему менеджмента качества, соответствующую стандарту ИСО 9001. Такая система разработана и внедрена в декабре 2010 г. Ее соответствие требованиям ИСО 9001 подтверждено сертификатами национальной системы аккредитации «Русский регистр» и международной IQNet. Работоспособность системы основывается на соблюдении более чем 40 стандартов в обеспечении качества как продуктов, так и метрологических вопросов. Для выполнения требований в области качества на каждый поставочный комплект разработан и утвержден план изготовления и контроля, который регламентирует основные операции, влияющие на качество изделий, включая операции, требующие присутствия специалистов Международной организации ИТЭР.

В настоящее время проводятся квалификация основных технологических процессов, используемых при изготовлении внутрикамерного оборудования, и изготовление полномасштабных макетов.

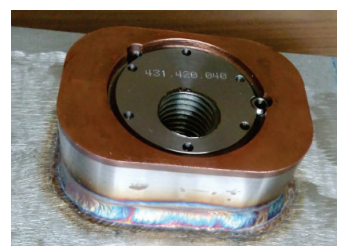
В АО «НИКИЭТ» создана открытая производственная площадка, оснащенная высокоточным оборудованием различного назначения, на базе которой изготавливаются компоненты поставочных комплектов.

В рамках требований системы менеджмента качества созданы специальные рабочие места, подключенные напрямую к базе данных конструкторских разработок Международной организации ИТЭР, организованной на базе европейской системы автоматического проектирования CATIA ENOVIA. Это позволило разработать и согласовать конструкции поставочных компонентов непосредственно в базе данных по 3D-моделям с последующим расчетным обоснованием и изготовлением.

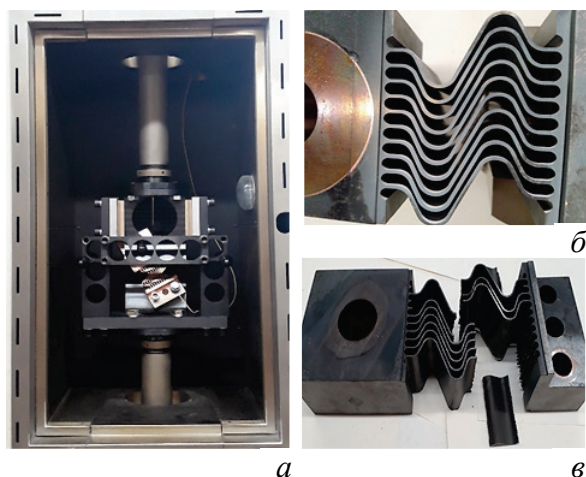
НИОКР в обоснование работоспособности внутрикамерных компонентов. Приведем основные результаты работ АО «НИКИЭТ», проведенных для критических компонентов.

Электрические соединители. Они входят в систему электрической связи и позволяют отводить наводящийся при срывах плазмы ток, который может достигать 137 кА, от модулей бланкета к вакуумной камере [6]. Разработанный электрический соединитель представляет собой выполненную из CuCrZr-бронзы цельнометаллическую конструкцию, между фланцами которой расположены 10 или 14 волнообразных токоведущих ламелей в зависимости от протекающего тока. Для снижения переходного электрического сопротивления на интерфейсе электрический соединитель—вакуумная камера принято решение выполнить слой CuCrZr толщиной 4 мм, что потребовало ввести в конструкцию отдельную биметаллическую деталь — пьедестал, а соединение бронзы и стали выполнять методом горячего изостатического прессования [7]. При этом соединение биметаллического пьедестала с вакуумной камерой или панелью первой стенки выполняется сваркой по стальной части. Биметаллические заготовки под пьедесталы изготавливаются АО «НИКИЭТ» совместно с АО «Композит» (рис. 2).

Изготовление электрического соединителя требует квалификации в целях подтверждения работоспособности под действием нагрузок, имитирующих комбинацию электромагнитных сил и моментов, а также возможные поводки вакуумной камеры, возникающие при сварке.

*a**б*

Р и с. 2. Общий вид компонентов сборки электрического соединителя: *a* — электрический соединитель; *б* — пьедестал с установленной резьбовой втулкой



Р и с. 3. Испытания электрического соединителя: *а* — электрический соединитель, установленный в оснастке в климатической камере; *б* — токоведущие ламели после испытаний, стадии 1, 2; *в* — токоведущие ламели после испытаний, стадия 3

Это может приводить к предварительному нагружению электрического соединителя, выражаемому в относительном смещении фланцев. Специалистами АО «НИКИЭТ» разработана программа квалификации и изготовлена оснастка, позволяющая испытывать поставочные изделия в климатической камере при температуре 290 °С (рис. 3).

Испытания проводили в соответствии с программой квалификации электрического соединителя:

стадия 1 — предварительное смещение бокового фланца относительно центрального на 1,7 мм с последующим выполнением 22 тыс. циклов относительного смещения фланцев с амплитудой $\pm 0,8$ мм;

стадия 2 — 400 циклов относительного смещения фланцев с амплитудой $\pm 2,2$ мм;

стадия 3 — нагружение амплитудой относительного смещения фланцев $\pm 2,2$ мм до полного разрушения объекта испытаний.

По результатам испытаний подтверждена циклическая прочность электрического соединителя на стадиях 1 и 2. По результатам стадии 3 предложены направления оптимизации конструкции электрического соединителя при возможном увеличении проектных нагрузок, вызванном отклонением при изготовлении вакуумной камеры и защитных блоков реактора.

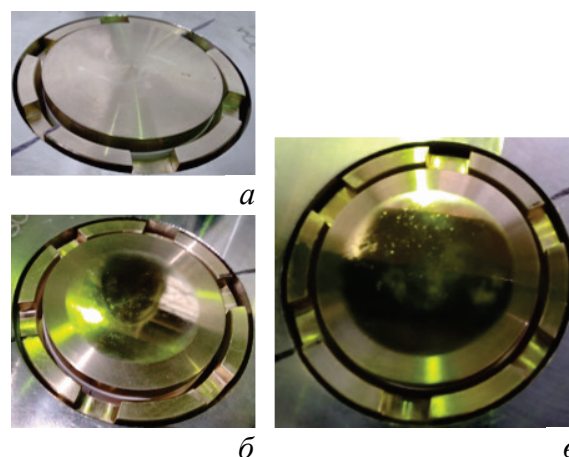
Испытания подтвердили работоспособность конструкции в условиях ИТЭР.

Контактные электроизолирующие накладки. Их конструкция представляет собой тело вращения с рабочей (контактной) сферической поверхностью радиусом 300 мм. Для обеспечения электрической изоляции на боковую и тыльную поверхности контактных электроизолирующих накладок нанесено электроизоляционное покрытие на базе Al_2O_3 [8].

При работе ИТЭРа накладки воспринимают комбинацию полоидального, тороидального и радиального моментов. Основываясь на расчетном и экспериментальном обосновании, наиболее представительными для подтверждения работоспособности контактных электроизолирующих накладок являются ударные испытания, которые имитируют механическое воздействие, характерное при срывах плазмы [9].

Для реализации ударных испытаний АО «НИКИЭТ» разработало и изготовило установку, представляющую собой копер вертикального типа с падающей массой 460 кг [10] (рис. 4). Ударные испытания позволили получить новые данные, необходимые для понимания факторов, которые влияют на работоспособность элементов системы крепления панели первой стенки при импульсных нагрузках, характерных для ИТЭРа.

Обобщая результаты испытаний, можно отметить, что характер поведения контактных электроизолирующих накладок при ударных испытаниях отличается от механических испытаний деформацией накладок в радиальном направлении и состоянием контактной сферической поверхности [11]. Зависимость деформации от осевого усилия свидетельствует об увеличении осевой силы при ее возрастании по



Р и с. 4. Контактная электроизолирующая накладка до испытания (*а*), после 50-го (*б*) и 500-го удара (*в*)

линейному закону. В то же время контактные электроизолирующие накладки со шлифованным электроизолирующим покрытием и накладка без шлифовки прошли испытания с одинаковым результатом, что позволяет отказаться от шлифовки.

Отмечено, что выглаживание сферической поверхности накладок существенно снижает шероховатость поверхности, позволяя отказаться от использования антифрикционного покрытия на сферической поверхности накладок, введенного в конструкцию ранее в целях уменьшения касательных усилий на накладки.

Полученные результаты позволяют упростить технологический процесс, что приведет и к удешевлению стоимости изготовления контактных электроизолирующих накладок.

Гибкая опора. Конструкция гибкой опоры показана на рис. 5. Ее основными элементами являются картридж, центральный болт, коническая гайка и вставка, сферическая шайба. Основным несущим элементом гибкой опоры является картридж, который изготавливается из высокопрочного никелевого сплава 718 и имеет один ряд спиц в сечении, что придает гибкой опоре достаточную поперечную гибкость в сочетании с необходимой осевой жесткостью. Для электрической изоляции защитного блока от вакуумной камеры на некоторые детали гибкой опоры наносится электроизолирующее покрытие [8].

В соответствии с требованиями Международной организации ИТЭР прочность внутрика-

мерных компонентов обосновывается по специально разработанным для ИТЭРа нормам расчета на прочность SDC-IC [12], основанным на французских нормах для ядерных установок RCC-MR, а также лучших практиках, применяемых в национальных стандартах стран-участниц проекта. Механическая прочность элементов конструкции гибкой опоры расчетно обоснована в соответствии с SDC-IC. Принятый подход для внутрикамерных компонентов [12] предполагает обязательное подтверждение работоспособности экспериментом. Для циклических механических испытаний гибкой опоры в АО «НИКИЭТ» разработана экспериментальная оснастка, позволяющая приложить поперечный относительный сдвиг (до 3 мм) и разворот (до 3 мрад) фланцев опоры, сжимающую/растягивающую силу до 1000 кН.

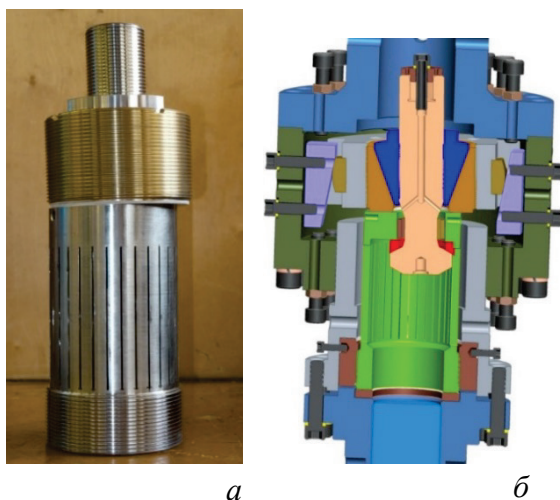
Образцы гибкой опоры успешно выдержали 4000 циклов нагружения осевой силой ± 500 кН, 4000 циклов по ± 600 кН, 4000 циклов по ± 800 кН и статические сжимающие и растягивающие нагрузки до 1000 кН при циклических поперечных смещениях ± 3 мм и циклическом угловом развороте ± 3 мрад.

Дальнейшие проработки направлены на подготовку конструкции к серийному изготовлению.

Заключение. Участие АО «НИКИЭТ» в разработке, изготовлении и поставке внутрикамерных компонентов ИТЭРа позволило создать новую производственную площадку, оснащенную высокоточным оборудованием различного назначения, внедрить систему менеджмента качества и инновационные методы трехмерного проектирования при разработке конструкций поставочных комплектов и технологической документации, а также при расчетном и экспериментальном обосновании их работоспособности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Фортов В.Е., Попель О.С.** Энергетика в современном мире. Долгопрудный: Изд. дом «Интеллект», 2011. 168 с.
2. **Bigot B.** ITER construction and manufacturing progress toward first plasma. — Fus. Engng Design, 2019, v. 146, Pt A, p. 124—129.
3. **Лешуков А.Ю., Стребков Ю.С., Кириллов С.Ю. и др.** Разработка конструкции, изготовление и экспери-



Р и с. 5. Экспериментальное обоснование прочности гибкой опоры: а — сборка гибкой опоры; б — испытательная оснастка для циклических испытаний гибкой опоры

- ментальное обоснование компонентов системы blankets ИТЭР, поставляемых АО «НИКИЭТ». — В сб.: V Межд. научно-технич. конф. «Инновационные проекты и технологии ядерной энергетики». Москва, АО «НИКИЭТ», 2018, с. 139—154.
4. Raffray R., Calcagno B., Chappuis P. e.a. The ITER blanket system design challenge. — Nucl. Fus., 2014, v. 54, № 3, p. 18.
 5. Khomiakov S., Poddubnyi I., Kolganov V. e.a. ITER blanket module connectors. Design, analysis and testing for procurement arrangement. — Fus. Engng Design, 2016, v. 109—111, Pt A, p. 261—266.
 6. Poddubnyi I., Kolganov V., Elkin V. e.a. Analysis and experimental justification of electrical connector for ITER blanket module. — Ibid., 2017, v. 124, p. 516—521.
 7. Чебурова А.В., Хомяков С.Э., Митин Д.А. и др. Биметаллическое соединение CuCrZr—316L для пьедесталов электрических соединителей blankets ИТЭР. — В сб.: Инновации в атомной энергетике. М., АО «НИКИЭТ», 2019, с. 1061—1067.
 8. Ulianitsky V., Shtertser A., Zlobin S. e.a. Computer-controlled detonation spraying: from process fundamentals toward advanced applications. — J. Thermal Spray Technol., 2011, v. 20, № 4, p. 791—801.
 9. Sviridenko M.N., Lechukov A.Yu., Razmerov A.V. e.a. Analyses results of the EHF FW Panel with welded fingers. — Fus. Engng Design, 2014, v. 89, p. 937—948.
 10. Kolganov V., Poddubnyi I., Timofeev S. e.a. Optimization and adjustment of impact set-up for testing of insulated pads of ITER blanket module connectors and first wall. — Ibid., 2019, v. 146, Pt B, p. 2474—2478.
 11. Драгунов Ю.Г., Лешуков А.Ю., Стребков Ю.С. и др. Разработка конструкции, изготовление и экспериментальное обоснование работоспособности компонентов системы blankets ИТЭР. — Вопросы атомной науки и техники. Сер. Термоядерный синтез, 2016, т. 39, вып. 4, с. 13—26.
 12. Sannazzaro G., Barabash V., Kang S.C. e.a. Development of design criteria for ITER in-vessel components. — Fus. Engng Design, 2013, v. 88, p. 2138—2141.

УДК 621.039.553

РЕАКТОРНЫЕ ИСПЫТАНИЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ГАЗООХЛАЖДАЕМЫХ ТВЭЛОВ

Булкин С.Ю., Кузьменко Р.С., Логинов Д.Ю., Ромадова Е.Л., Черепнин Ю.С., Шутько К.И.

(АО «НИКИЭТ», г. Москва), Ижutow А.Л. (АО «ГНЦ НИИАР», г. Димитровград),

Меркурисов И.Х. (АО «ГНЦ РФ — ФЭИ, г. Обнинск)

e-mail: d.loginov@nikiet.ru

В настоящее время наблюдается интерес к использованию высокотемпературных газоохлаждаемых реакторов. В проекте Prometheus (США) предполагается использование ТВЭлов с молибденовыми оболочками и гелий-ксеноновым теплоносителем максимальной температурой 880 °С [1]. Близкие параметры имеет отечественный проект космического реактора [2]. Подтверждение работоспособности высокотемпературных ТВЭлов с тугоплавкими оболочками было получено в серии ампульных испытаний [3]. Для испытаний при циркуляции гелий-ксенонового теплоносителя в модернизированной петлевой установке ПГ-1 реактора МИР.М1 была использована экспериментальная ТВС с 13 ТВЭлами (рис. 1). Основные цели методического эксперимента: отработка технологии обращения с таким теплоносителем, верификация кодов и методик расчетов, отработка режимов вывода экспериментальной ТВС на мощность, поддержание параметров испытаний на заданных уровнях.

Для испытаний была разработана экспериментальная ТВС, в состав которой входили

13 стержневых ТВЭлов с топливом в виде диоксида урана с оболочкой из монокристаллического сплава на основе молибдена (рис. 2, 3). ТВС оснащена термоэлектрическими преобразователями для измерения температуры оболочки ТВЭлов (в составе термотвэлов) и теплоносителя и импульсными трубками для контроля давления. Были проведены нейтронно-физический, тепло-

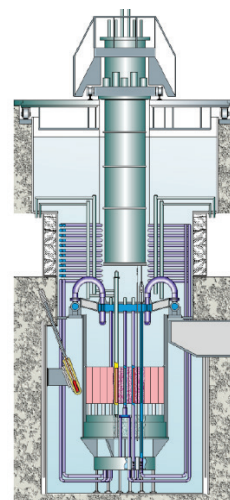


Рис. 1. Общий вид реактора МИР.М1