

УДК 621.039.634

СИСТЕМА МЕХАНИЧЕСКОГО КРЕПЛЕНИЯ ПАНЕЛЕЙ ПЕРВОЙ СТЕНКИ БЛАНКЕТА ИТЭР

М.Н. Свириденко, А.Ю. Лешуков, А.В. Размеров, С.Н. Томилов, Е.В. Паришутин, Ю.С. Стребков

АО «Ордена Ленина Научно-исследовательский и конструкторский институт энерготехники им. Н.А. Доллежалая», Москва, Россия

Российская Федерация в лице Частного учреждения Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом» «ИТЭР-Центр» изготовит и поставит в ИТЭР 40% энергонапряжённых панелей первых стенок в соответствии с Соглашением о Поставке № 1.6.P1A.RF.01, подписанным 14 февраля 2014 г. Реализация данного Соглашения о Поставке распределена между двумя основными поставщиками — АО «НИКИЭТ» и АО «НИИЭФА». АО «НИКИЭТ» отвечает за изготовление несущих конструкций панелей первой стенки, корпусов энергонапряжённых компонентов, системы механического крепления панели первой стенки и системы электрической связи «панель первой стенки/защитный блок модуля blankets». Система механического крепления панели первой стенки включает радиальные и полоидальные контактные накладки с нанесённым электроизоляционным покрытием, центральный болт с системой законтривания резьбы и резьбовой стакан под размещение центрального болта. Данная система механического крепления позволяет обеспечить установку/демонтаж панели первой стенки на защитном блоке, воспринимать электромагнитные силы, возникающие при срывах плазмы, а также предотвратить появление зазора между радиальными контактными накладками и защитным блоком при срывах плазмы. Данная статья содержит описание конструкции системы механического крепления панели первой стенки, результаты расчётного и экспериментального обоснований, выполненных специалистами АО «НИКИЭТ» в период 2014—2015 гг.

Ключевые слова: blankets, теплонапряжённая первая стенка, система крепления, контактные накладки, электрическая изоляция.

MECHANICAL ATTACHMENT SYSTEM OF THE FIRST WALL PANELS IN ITER BLANKET

M.N. Sviridenko, A.Yu. Leshukov, A.V. Rasmerov, S.N. Tomilov, E.V. Parshutin, Yu.S. Strebkov

Joint Stock Company «N.A. Dollezhal Research and Development Institute of Power Engineering», Moscow, Russia

The Russian Federation Domestic Agency (RF DA) shall procure 40% of all the enhanced heat flux (EHF) first wall (FW) panels required for the ITER machine in accordance with the Procurement Arrangement 1.6.P1A.RF.01, signed on 14.02.2014. The realization of this Procurement Arrangement is shared through collaboration between two main suppliers in Russian Federation — JSC NIKIET and JSC NIIIEFA. The JSC NIKIET is responsible for the manufacturing of the FW beam, finger load-bearing casings, system of the FW mechanical attachment to the shield block (SB) and the FW/SB electrical straps. The mechanical attachment system includes radial- and X-pads coated with electrical insulation and low friction coatings, the central bolt and thread locking mechanisms, threaded barrel and system of washers. This FW mechanical attachment system shall provide the installation of the FW panel onto the shield block and to withstand all the external forces acting during the plasma disruptions (in particular preventing the opening of gaps between radial pads and SB) and during the normal operation. This paper presents the design description of the first wall attachment system, thermal and structural analyses results and the experimental results for central bolt, thread locking mechanism and pads serviceability obtained by JSC NIKIET specialists during the period of 2014—2015.

Key words: blanket system, enhanced heat flux first wall, attachment system, pads, electrical insulation.

DOI: 10.21517/0202-3822-2016-39-2-29-43

ВВЕДЕНИЕ

14 февраля 2014 г. Российская Федерация в лице Частного учреждения Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом» «ИТЭР-Центр» и Международная организация ИТЭР (МО ИТЭР) подписали Соглашение о Поставке теплонапряжённых (воспринимаемый тепловой поток до 5 МВт/м²) панелей первых стенок (ППС). В соответствии с указанным Соглашением необходимо изготовить и поставить на площадку ИТЭР 179 панелей первых стенок восьми типоразмеров [1]. Данная работа выполнена в рамках Соглашения о Поставке теплонапряжённых панелей первой стенки.

Официальными поставщиками в Российской Федерации являются АО «НИКИЭТ» и АО «НИИЭФА», при этом АО «НИКИЭТ» является ответственным за изготовление и поставку в АО «НИИЭФА» для окончательной сборки следующих компонентов ППС:

- полуфабрикатов несущих конструкций;
- полуфабрикатов корпусов энергонапряжённых компонентов;

— систем механического крепления и электрической коммутации «панель первой стенки/защитный блок модуля blankets».

Система механического крепления фиксирует панель на защитном блоке blankets в процессе эксплуатации ИТЭР, а также обеспечивает возможность её демонтажа при штатной замене или повреждении.

В состав системы механического крепления входят радиальные (РКН) и полоидальные контактные накладки (ПКН), воспринимающие полоидальный и радиальный моменты соответственно при срывах плазмы, а также центральный болт с системой шайб, позволяющих компенсировать погрешности установки ППС при монтаже. Особенность системы механического крепления — электроизоляционное покрытие, нанесённое на элементы системы крепления, позволяющее развязать электрически ППС и защитный блок модуля blankets и тем самым снизить электромагнитные силы при срывах плазмы.

Специалистами АО «НИКИЭТ» проведены расчётные и экспериментальные работы по обоснованию работоспособности системы механического крепления ППС. При этом следует отметить, что рассмотренная в статье конструкция ППС является базовой (утверждённой МО ИТЭР) для теплонапряжённых панелей первой стенки. Остальные 60% ППС будут иметь идентичную с рассмотренной систему крепления. Для ППС, предназначенных для восприятия теплового потока до 2 МВт/м^2 (Normal Heat Flux First Wall Panels-NHF FW, поставка ЕС), в настоящее время рассматривается сварной стакан в системе крепления, вариант РФ (резьбовое крепление стакана) проходит согласование.

ОПИСАНИЕ КОНСТРУКЦИИ

ППС — обращённый к плазме внутрикамерный компонент ИТЭР (габаритные размеры панели в тороидальном, полоидальном и радиальном направлениях составляют $\sim 1400 \times 1100 \times 300 \text{ мм}$) механически фиксируется на фронтальной (обращённой к плазме) поверхности защитного блока (ЗБ) blankets посредством системы механического крепления.

ППС представляет собой сборочную единицу [1], включающую следующие компоненты: энергонапряжённые компоненты, обращённые к плазме (пальцы ПС), несущую конструкцию (НКПС), защитный тепловой экран (ЗТЭ), системы механического крепления (СК) и электрической связи. Общий вид ППС представлен на рис. 1.

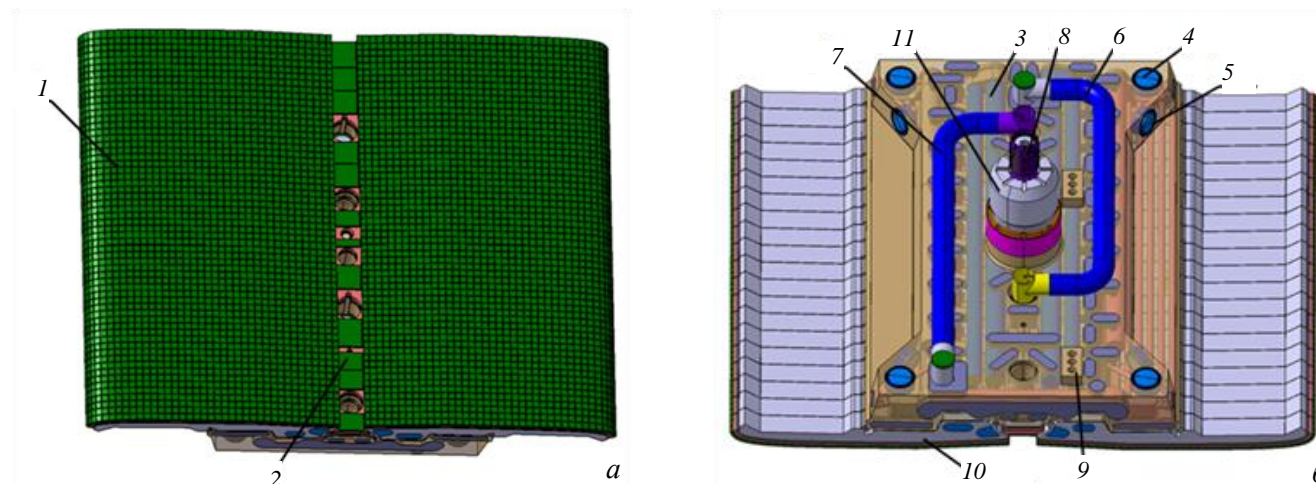


Рис. 1. Общий вид ППС № 14 типа А: а — вид со стороны плазмы: 1 — защитное покрытие, 2 — ЗТЭ; б — вид со стороны ЗБ: 3 — НКПС, 4 — РКН, 5 — ПКН, 6 — патрубок подвода теплоносителя, 7 — патрубок отвода теплоносителя, 8 — центральный болт, 9 — пьедестал электрического соединителя, 10 — пальцы ПС, 11 — стакан

НКПС является опорной структурой для пальцев, каждый из которых фиксируется на её внешней поверхности с помощью двух силовых сварных швов. Кроме того, пальцы ПС соединены с НКПС гидравлически: теплоноситель поступает в раздаточные коллекторы НКПС, а затем — в тракты охлаждения пальцев ПС.

Для восприятия радиальных и полоидальных моментов, возникающих при срывах плазмы, на тыльной и боковой поверхностях НКПС (см. рис. 1, б) установлены контактные электрически изолированные накладки (КЭИН). Общий вид КЭИН представлен на рис. 2. КЭИН имеет рабочую сферическую поверхность радиусом 300 мм. Для обеспечения самоустановки КЭИН в гнезде НКПС на боковой поверхности КЭИН выполнена коническая поверхность с углом 30° при вершине. По условиям работы КЭИН необходимо электрически изолировать от НКПС, поэтому на боковую и тыльную их поверхности нанесено электроизоляционное покрытие (ЭИП) толщиной $0,3_{-0,05}$ мм. В качестве материала ЭИП используется окись алюминия (Al_2O_3) или алюмомагнезиальная шпинель ($MgAl_2O_4$).

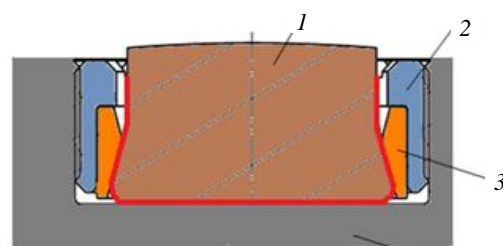


Рис. 2. Общий вид КЭИН: 1 — КЭИН; 2 — фиксирующая гайка; 3 — коническая шайба; 4 — НКПС

Следует отметить, что разработано и утверждено в МО ИТЭР три типоразмера КЭИН: тип А, тип Б и тип С (рис. 3). Основные отличия трёх типоразмеров КН — диаметр цилиндрической поверхности и наличие конической шайбы под фиксирующей гайкой.

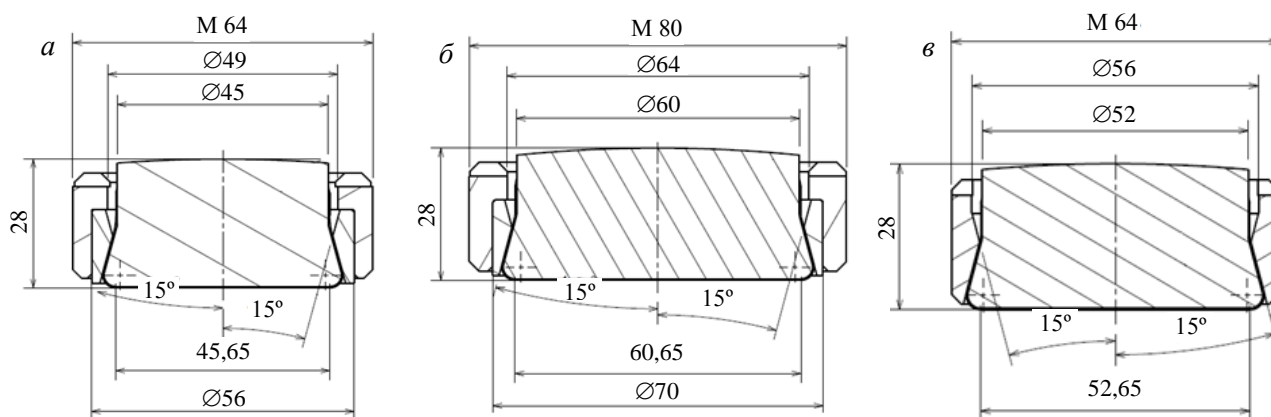


Рис. 3. Типоразмеры КЭИН: а — тип А; б — тип Б; в — тип С

В качестве материала КЭИН для всех типов используется никель-алюминиевая бронза. Материал гайки, фиксирующей КЭИН в теле НКПС для типов А и В, — сталь марки 316L(N)-IG. Материал шайбы для типов А и В — никель-алюминиевая бронза. При этом для КЭИН типа С шайба отсутствует, а фиксирующая гайка выполнена из никель-алюминиевой бронзы и снабжена конической поверхностью для обеспечения самоустановки КЭИН в нише несущей конструкции. Для всех типов КЭИН тыльная поверхность 4 покрытая ЭИП, контактирует со сталью марки 316L(N)-IG, при этом боковая поверхность КЭИН, также покрытая ЭИП, контактирует с алюминиевой бронзой. Во всех ППС КЭИН типа С используются в качестве радиальных контактных накладок (РКН), при этом КЭИН типа А или Б используются в качестве полоидальных контактных накладок (ПКН) в зависимости от геометрии. Осевое усилие затяга гайки, фиксирующей КЭИН, составляет величину порядка 10 кН для обеспечения среднего контактного давления не менее 5 МПа для типов А и С, для КЭИН типа Б осевое усилие затяга гайки 20 кН.

Центральный болт (материал — Inconel 718) расположен в специально предусмотренном стакане на тыльной поверхности ППС (рис. 4). Для компенсации ошибок при сборке и предотвращения изгиба стержня болта под головкой центрального

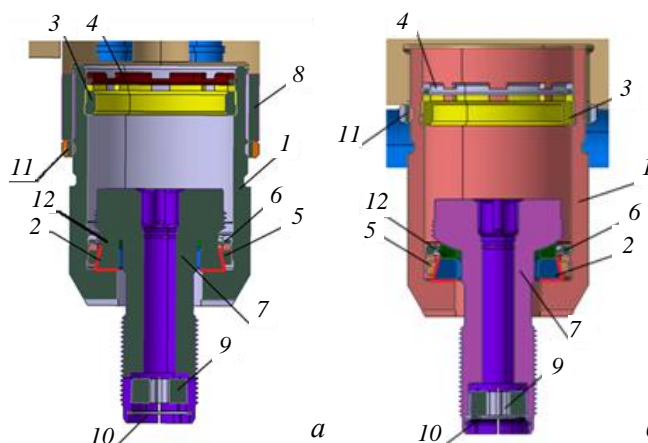


Рис. 4. Система крепления ППС внешнего blankets (а), ППС blankets, расположенного на верхнем своде вакуумной камеры (б): 1 — стакан; 2 — шайба с ЭИП; 3 — транспортировочная шайба; 4 — стопорное резьбовое кольцо; 5 — фиксирующая гайка шайбы с ЭИП; 6 — стопорное резьбовое кольцо; 7 — болт; 8 — промежуточная обечайка; 9 — коническая резьбовая втулка; 10 — стопорное кольцо; 11 — гайка шлицевая; 12 — шайба сферическая

ного болта СК установлена шайба со сферической контактной поверхностью (радиус 100 мм). Для электрической изоляции болта от НКПС в конструкцию введена дополнительная шайба с конической боковой поверхностью, на которую нанесено ЭИП. В качестве ЭИП также используется Al_2O_3 или $MgAl_2O_4$. Фиксация шайбы с ЭИП к стакану НКПС выполняется с помощью резьбового кольца, выполненного из никель-алюминиевой бронзы. В верхней части стакана установлено резьбовое кольцо с внешней резьбой М125×2 и внутренней резьбой М110×4, предназначенной для фиксации болта при транспортировке ППС, соответственно головка болта снабжена ответной внешней резьбой. Для предотвращения отвинчивания болта при эксплуатации выполняется законтривание резьбового соединения «болт/резьбовая вставка ЗБ» с помощью конической втулки, выполненной из стали Grade 660. Резьбовая часть стержня болта перфорирована восемью продольными пазами шириной 2 мм, образуя восемь спиц по аналогии с цанговым захватом. Коническая втулка вкручивается в перфорированную резьбовую часть стержня болта по конической резьбе (К 1 1/2 ГОСТ 6111-52) и фиксируется стопорным кольцом. Через центральное отверстие в болте выполняется затяг конической втулки, в процессе которого перфорированная часть болта прижимается к резьбовой вставке ЗБ. Таким образом, в болтовом соединении СК панели ПС создаётся дополнительное радиальное усилие, предотвращающее откручивание болта. Диаметр центрального отверстия в болте составляет 26 мм, при этом в конической втулке выполнено звездообразное углубление под ключ TORX T100 по ГОСТу ИСО 10664-2007.

Диаметр внутреннего отверстия болта позволяет гарантировать зазор 2 мм на сторону между отверстием в болте и инструментом в соответствии с требованиями МО ИТЭР. Данное конструкторское решение согласовано с группой дистанционного обслуживания (Remote Handling Group) МО ИТЭР, так как возможности используемого манипулятора ограничены как технически (обеспечиваемый момент затяга не более 10 кН·м), так и геометрически (несоосность рабочего органа манипулятора и затягиваемого болта не более ±2 мм). В свою очередь, манипулятор системы дистанционного обслуживания разрабатывается специалистами Remote Handling Group МО ИТЭР совместно с Японским национальным агентством ИТЭР (JA DA).

Для предотвращения схватывания в резьбовых соединениях применяется антисхватывающее/антифрикционное покрытие на основе MoS_2 . Данное покрытие должно быть нанесено на все резьбовые поверхности системы крепления и обеспечивать коэффициент трения на уровне 0,1—0,15. Данные значения позволят обеспечить необходимое осевое усилие в болте после затяга, не повредив при этом болт. Для обеспечения требований приложения Б к Соглашению о Поставке панелей ПС по очистке, упаковке, транспортировке и хранению был разработан резьбовой вариант стакана НКПС, позволяющий:

- упростить процесс сборки ППС;
- защитить детали с покрытиями разного функционального назначения от повреждений при сварке и очистке;
- улучшить ремонтпригодность (заменяемость) элементов конструкции, размещённых в стакане.

Исполнение резьбового стакана для ППС, расположенных в верхней части бланкета, и для внешнего бланкета различны в силу их конструктивных особенностей (см. рис. 4). В ППС бланкета, расположенных на верхнем своде вакуумной камеры (ВК) стакан ввинчивается непосредственно в НКПС (по резьбе М150×4), при этом в модулях внешнего бланкета стакан ввинчивается в промежуточную обечайку (по резьбе М145×4), приваренную аргонодуговой сваркой (АДС) к НКПС.

Законтривание резьбы стакана выполняется резьбовым кольцом. Для ввинчивания стакана в НКПС используются шлицевые пазы, выполненные на тыльной поверхности. В качестве конструкционного материала стакана используется алюминиевая бронза ($CuAl10Ni5Fe4$).

Для предотвращения самоотвинчивания резьбовых соединений, фиксирующих шайбу с ЭИП (поз. 2, рис. 4) и резьбовое кольцо (поз. 3, рис. 4), в конструкции использованы стопорные резьбовые кольца (поз. 6 и 4, рис. 4).

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЁТНОГО ОБОСНОВАНИЯ

Для расчётного обоснования была выбрана панель ПС № 14 типа А, являющаяся одной из самых нагруженных с точки зрения нейтронного потока ($0,78 \text{ МВт/м}^2$), поэтому максимальная температура в элементах системы механического крепления будут достигаться именно в этой панели.

Расчёт температурных полей и прочности конструкций blankets производится в соответствии с [2].

Расчётная модель представлена на рис. 5 и включает ППС с элементами крепления и защитный блок с гибкими механическими опорами. Защитный блок был добавлен в расчётную модель для корректного моделирования граничных условий при проведении расчётов полей температуры.

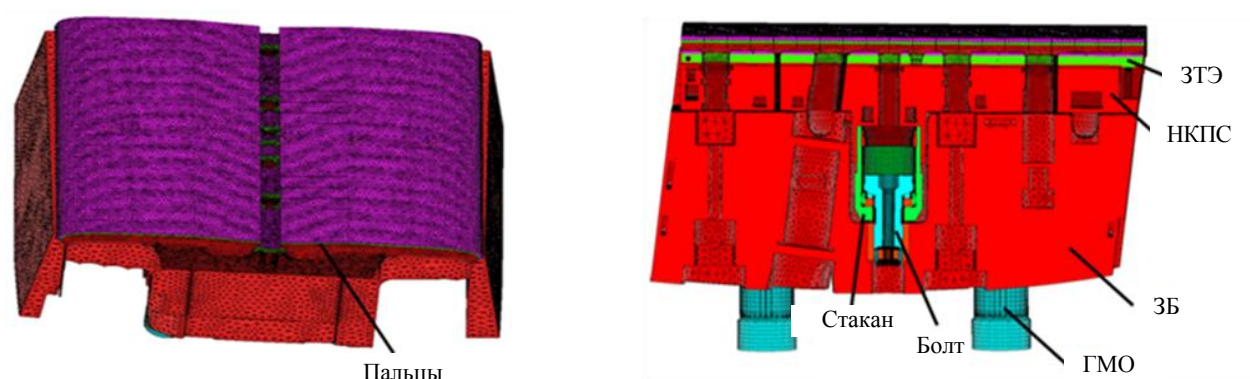


Рис. 5. Расчётная модель ППС № 14 типа А

Свойства следующих материалов использовались для расчётов [3]:

- 316L(N)-IG — НКПС, ЗБ и корпуса пальцев;
- Inconel 718 — центральный болт и сферическая шайба;
- никель-алюминиевая бронза — КЭИН и стакан системы крепления;
- бериллий — защитное покрытие пальцев и ЗТЭ;
- CuCrZr — теплопроводящий слой пальцев ПС и ЗТЭ;
- 660 Grade — электроизоляционная шайба, резьбовые вставки и коническая втулка.

Следующие граничные условия использовались при расчёте температурных полей в конструкции ППС [2]:

- режим Inductive I: импульс 1800 с (горение 400 с, пауза 1400 с), мощность 500 МВт;
- температура ядра теплоносителя во входной петле тракта ППС 70 °С;
- температура ядра теплоносителя в выходной петле тракта ППС 100 °С;
- температура ядра теплоносителя в тракте ЗТЭ 90 °С;
- плотность теплового потока на фронтальную поверхность ЗТЭ 0,217 МВт/м²;
- плотность теплового потока на фронтальную поверхность пальцев 0,35 МВт/м²;
- распределения коэффициента интенсивности теплоотдачи в тракте охлаждения ППС и объёмного энерговыделения в конструкции представлены на рис. 6;
- значение контактной проводимости для резьбовых интерфейсов принято равным 500 Вт/(м²·К) и 1000 Вт/(м²·К) — для остальных интерфейсов.

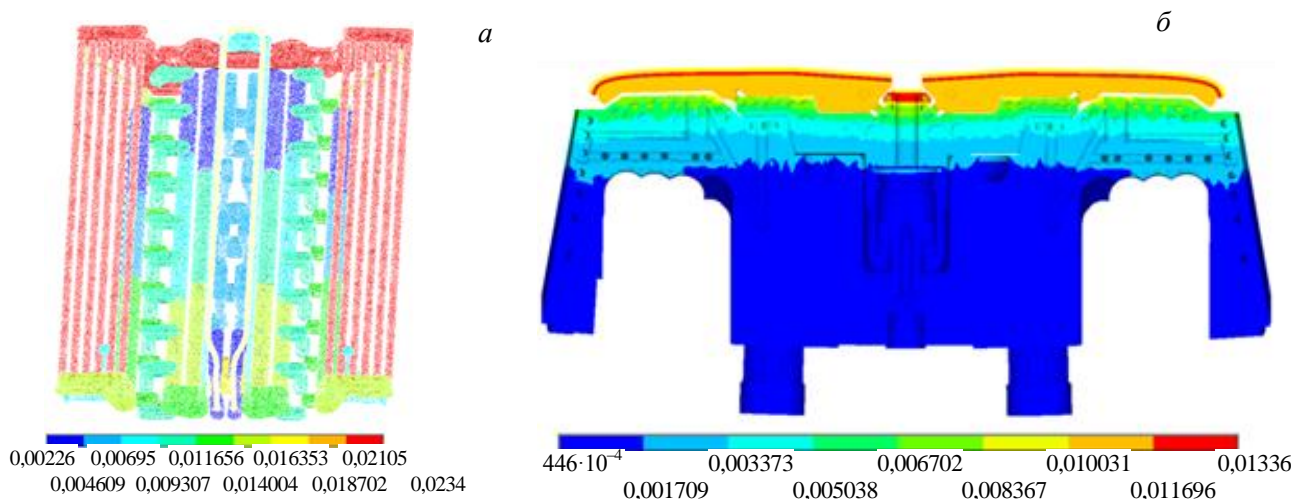


Рис. 6. Граничные условия: а — коэффициент интенсивности теплоотдачи, Вт/(мм²·К); б — объёмное энерговыделение, Вт/мм³

Зависимость изменения температуры от времени в элементах системы механического крепления в режиме Inductive I представлена на рис. 7. Следует отметить, что температура в КЭИН стабилизируется за 2—3 импульса, при этом в зоне расположения болта стабилизация температуры происходит за 10—12 импульсов.

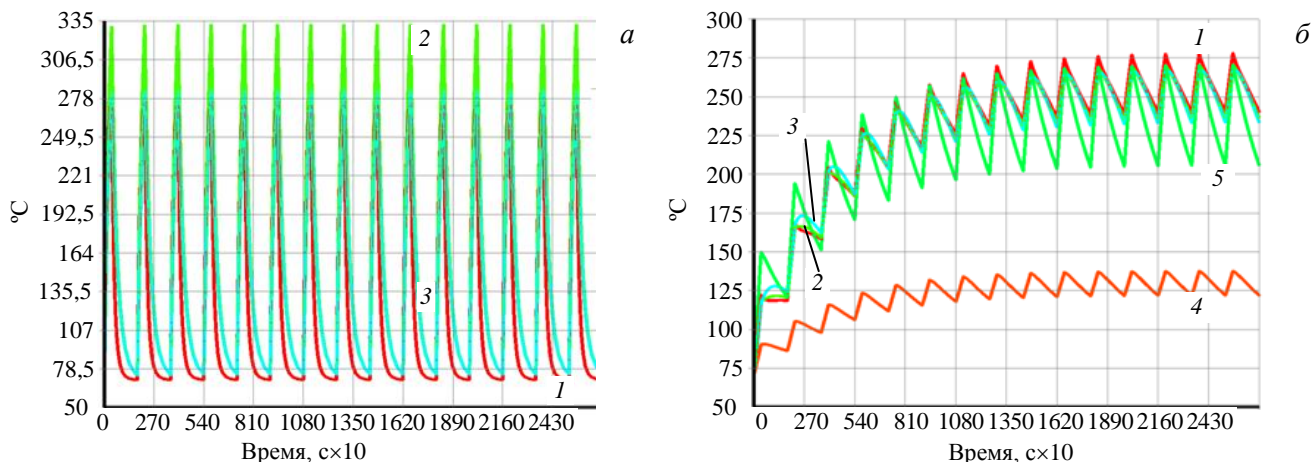


Рис. 7. Зависимость изменения температуры от времени в элементах системы механического крепления, °С: 1 — НКПС, 2 — ПКН, 3 — РКН (а); 1 — болт, 2 — сферическая шайба, 3 — шайба с ЭИП, 4 — резьбовая вставка, 5 — стакан (б)

Распределение температуры в элементах системы механического крепления ППС № 14 типа А в «горении плазмы» режима Inductive I представлено на рис. 8. Максимальная температура в фазе «горение плазмы» составляет 384 °С и достигается в корпусе пальца ПС, при этом в «паузе» максимальная температура составляет 240 °С и достигается в головке болта.

В фазе «горение» максимальная температура в РКН составляет 283 °С, в ПКН 332 °С, а максимальная температура в стакане составляет 270 °С.

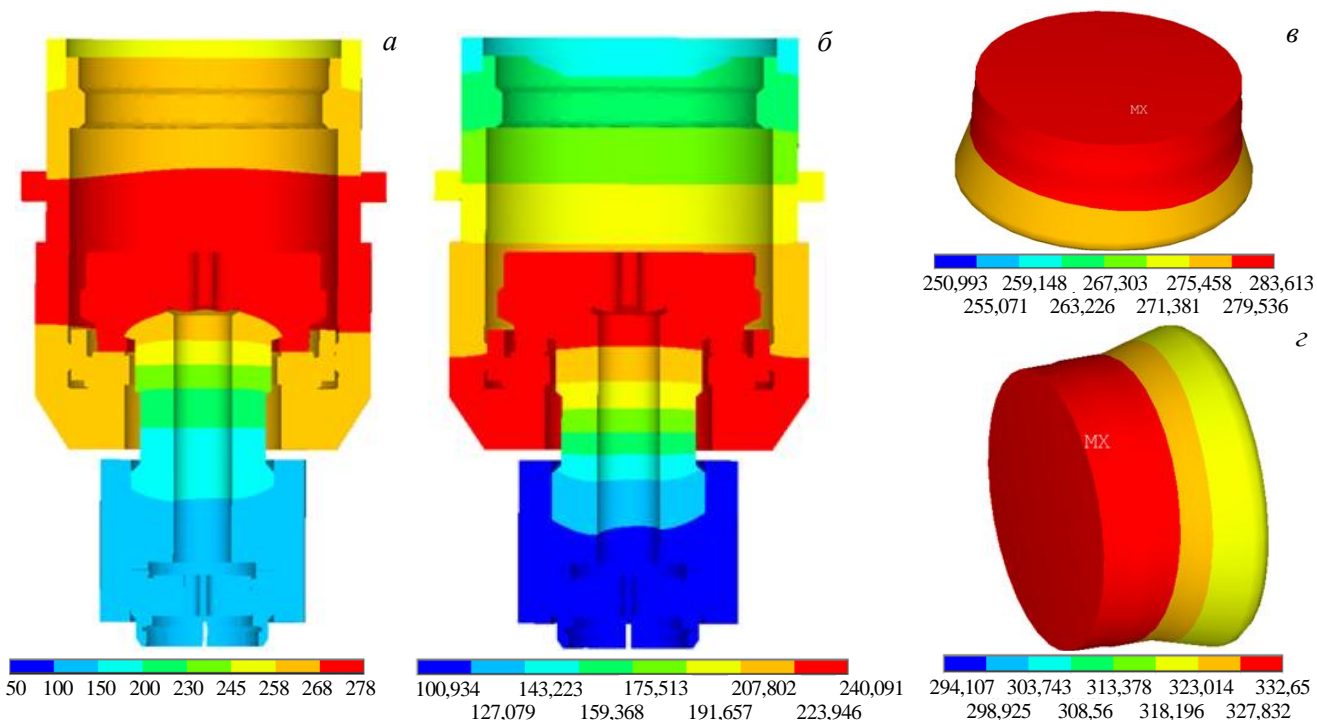


Рис. 8. Распределение температуры в элементах СК в режиме Inductive I, °С: а — элементы крепления, расположенные в стакане («горение», 25 600 с); б — элементы крепления, расположенные в стакане («пауза», 27 000 с); в — РКН («горение», 25 600 с); г — ПКН («горение», 25 600 с)

По результатам температурного расчёта следует отметить, что энергия термоядерных нейтронов, достигающих по глубине рассматриваемых в статье элементов крепления (согласно нейтронно-физическим расчётам МО ИТЭР), составит порядка 3,6—2 МэВ, рабочая температура резьбовых соединений согласно полученным результатам не превысит 400 °С. Таким образом, учитывая ещё и импульс-

ный режим работы ИТЭР, ни флюенс нейтронов, ни температура не достигнут значений, критических для используемых в blankets ИТЭР материалов (10^{19} н./см² и 450 °С соответственно).

Далее определены допускаемые значения сил и моментов для стакана и резьбового соединения «стакан/НКПС» при температуре 20 °С, соответствующей затягу резьбовых соединений, и при 250 °С, соответствующей режиму «прогрев». Полученные результаты расчёта для ППС внешнего blankets и панелей, расположенных на верхнем своде ВК, представлены в табл. 1—3.

Т а б л и ц а 1. Допускаемые значения растягивающей и поперечной сил, крутящего и изгибающего моментов из условия прочности стакана для ППС № 14, тип А и № 8, тип А

Панель ПС		14, тип А	8, тип А
Допускаемая сила растяжения по критерию прочности цилиндрической части стакана			
Элемент	T, °С	Sm, МПа	Ftens, кН
Верхняя часть	20,0/250,0	200,0/173,0	772,6/668,3
Нижняя часть			1271,7/1100,0
Допускаемая сила среза по критерию прочности цилиндрической части стакана			
Элемент	T, °С	[Sshear], МПа	Fshear, кН
Верхняя часть	20,0/250,0	120,0/103,8	463,6/401,0
Нижняя часть			763,0/660,0
Допускаемая сила среза по критерию прочности дна стакана			
Элемент	T, °С	[Sshear], МПа	Fshear, кН
Днище	20,0/250,0	120,0/103,8	1318,1/1140,1
Допускаемый крутящий момент по критерию прочности цилиндрической части стакана			
Элемент	T, °С	[Sshear], МПа	Mk, кН·м
Верхняя часть	20,0/250,0	120,0/103,8	28,1/24,3
Нижняя часть			46,9/40,6
Допускаемый изгибающий момент по критерию прочности цилиндрической части стакана			
Элемент	T, °С	[Sbend], МПа	Mb, кН·м
Верхняя часть	20,0/250,0	300,0/259,5	35,1/30,4
Нижняя часть			58,7/50,7

Т а б л и ц а 2. Допускаемые значения растягивающей (осевой) силы из условия прочности резьбового соединения «стакан/НКПС» для панели ПС № 14, тип А и № 8, тип А

Допускаемая сила по критерию прочности витков резьбы на срез			
Элемент	T, °С	[Sshear], МПа	Ftens, кН
ПС 14 А	20,0/250,0	120,0/103,8	1153,6/997,9
ПС 8 А			1263,4/1092,8
Допускаемая сила по критерию прочности витков резьбы на смятие			
Элемент	T, °С	[Spres], МПа	Ftens, кН
ПС 14 А	20,0/250,0	810,0/699,3	7865,3/6790,4
ПС 8 А			9257,6/7992,4

Т а б л и ц а 3. Допускаемые значения осевой и поперечной сил, крутящего и изгибающего моментов из условия прочности обечайки для панели ПС № 14, тип А

Допускаемая сила растяжения по критерию прочности обечайки				
Материал	T, °С	Sm, МПа	A, мм ²	Ftens, кН
Сталь	20,0/250,0	147,0/121,0	4523,8	665,0/547,4
Допускаемая сила среза по критерию прочности обечайки				
Материал	T, °С	[Sshear], МПа	A, мм ²	Fshear, кН
Сталь	20,0/250,0	88,2/72,6	4523,8	399,0/328,4
Допускаемый крутящий момент по критерию прочности обечайки				
Материал	T, °С	[Sshear], МПа	Wk, мм ³	Mk, кН·м
Сталь	20,0/250,0	88,2/72,6	333711,2	29,4/24,2
Допускаемый изгибающий момент по критерию прочности обечайки				
Материал	T, °С	[Sbend], МПа	Wb, мм ³	Mb, кН·м
Сталь	20,0/250,0	220,5/181,5	166855,6	36,8/30,3

Примечание: A — минимальная площадь поперечного сечения, мм²; Wk, Wb — момент сопротивления кручению и изгибу, мм³; Ftens, Fshear — допускаемые силы растяжения и среза, кН; Mb, Mk — допускаемые изгибающий и крутящий моменты, кН·м; Sm, [Sbend], [Sshear] — допускаемые напряжения растяжения, изгиба и среза, МПа; T — температура, °С.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОБОСНОВАНИЯ

Испытания КЭИН. Два варианта КЭИН были изготовлены и испытаны в АО «НИКИЭТ» (рис. 9). Цель испытаний — оценка работоспособности ЭИП, нанесённого на поверхность КЭИН, при действии нагрузок, характерных для бланкета ИТЭР. При испытаниях проводился постоянный контроль нагрузки и перемещения поршня гидроцилиндра, а также запись параметров в файл испытаний, отображение диаграмм «нагрузка-время» и «нагрузка-перемещение» выполнялось в реальном времени на экране монитора.

Все испытания проводились на воздухе при температуре 20 °С и относительной влажности не более 40%. Схема нагружения и испытательная оснастка в сборе показаны на рис. 10, основные результаты испытаний приведены в табл. 4, 5.

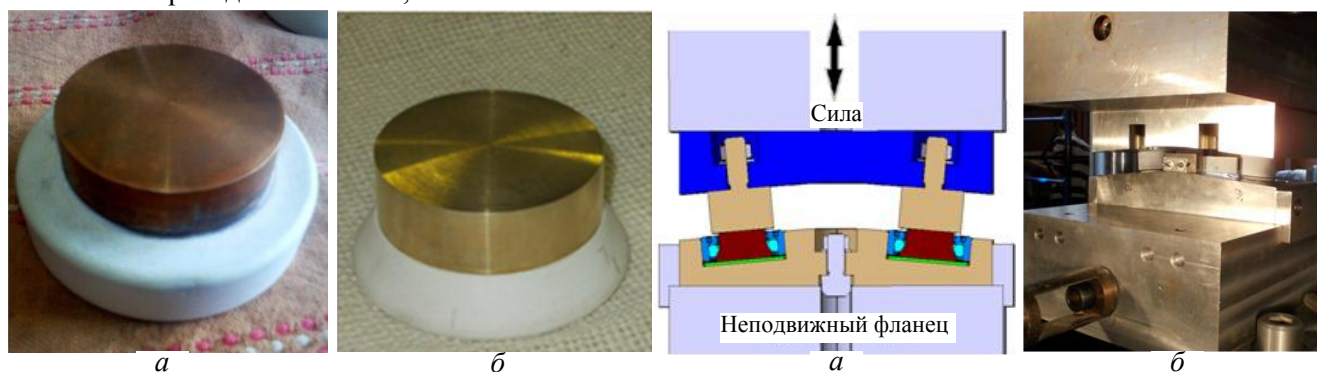


Рис. 9. Образцы КЭИН для испытаний: *а* — цилиндрическая боковая поверхность; *б* — коническая боковая поверхность
Рис. 10. Схема нагружения (*а*) и испытательная оснастка в сборе (*б*)

Т а б л и ц а 4. Результаты испытаний КЭИН с ЭИП на цилиндрической боковой поверхности

№ КЭИН	Режимы испытаний			Состояние ЭИП после испытаний	Примечание
	Максимальная нагрузка цикла, кН	Минимальная нагрузка цикла, кН	Число циклов		
5, 10	-160	-320	5000	В норме	
	-160	-320	5000	В норме	
	-160	-400	5000	В норме	
	-160	-500	5000	В норме	
2, 7	-160	-550	100	В норме	
	-160	-600	100	В норме	
	-160	-650	100	В норме	
	-160	-700	100	В норме	
	-160	-750	100	В норме	
	0	-500	5100	В норме	
1, 4	0	-700	5000	В норме	Фреттинг
	0	-750	5000	В норме	Фреттинг
	0	-800	500	В норме	Фреттинг
	0	-900	500	В норме	Фреттинг
9, 6	0	-900	5000	В норме	Смазка, отсутствие фреттинга

Т а б л и ц а 5. Результаты испытаний КЭИН с ЭИП на конической боковой поверхности

Пара	№ КЭИН	Режимы испытаний			Состояние ЭИП после испытаний	Примечание
		Максимальная нагрузка цикла, кН	Минимальная нагрузка цикла, кН	Число циклов		
1	10, 13	0	-500	5000	В норме	Фреттинг MoS ₂ на конической поверхности КЭИН
		0	-700	5000	В норме	
		0	-900	5000	В норме	
		0	-1000	100	В норме	
		0	-1100	100	В норме	
		0	-1200	100	В норме	
		0	-1300	100	В норме	
		0	-1400	100	В норме	
		0	-500	5000	В норме	
		0	-700	5000	В норме	
2	1, 8	0	-900	5000	В норме	
		0	-1000	100	В норме	
		0	-1100	100	В норме	
		0	-1200	100	В норме	
		0	-1300	100	В норме	
		0	-1400	100	В норме	
		0	-500	5000	В норме	
		0	-700	5000	В норме	
		0	-900	5000	В норме	
		0	-1000	100	В норме	
0	-1100	100	В норме			
0	-1200	100	В норме			
0	-1300	100	В норме			
0	-1400	110	В норме			
0	-1600	100	В норме			
0	-1700	20	В норме	Фреттинг		

КЭИН с ЭИП на цилиндрической поверхности после проведения испытаний представлены на рис. 11—13.



Рис. 11. КЭИН № 2 (а) и № 7 (б) (цилиндрическая боковая поверхность с ЭИП) после испытаний

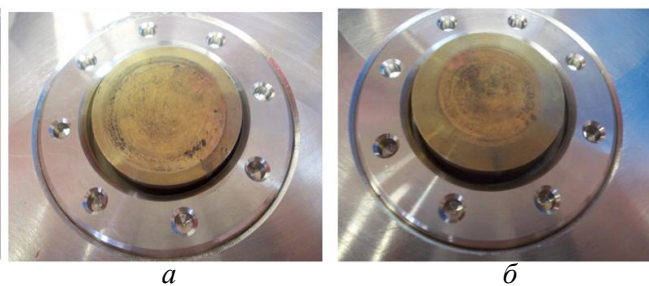


Рис. 12. КЭИН № 1 (а) и № 4 (б) (цилиндрическая боковая поверхность с ЭИП) после испытаний

Результаты испытаний КЭИН с цилиндрической боковой поверхностью, снабжённой ЭИП:

- подтверждена работоспособность ЭИП (обеспечены электроизоляционные свойства) во всех режимах циклического нагружения;

- при нагружении на контактных (металлических) поверхностях КЭИН возникают продукты фреттинг-износа, которые не влияют на электроизолирующие свойства покрытия, фреттинг-износ не возникает при использовании смазки на основе MoS_2 .

Результаты испытаний КЭИН с ЭИП на конической боковой поверхности приведены в табл. 5, испытанные пары КЭИН показаны на рис. 14, 15.



Рис. 13. КЭИН № 9 (а) и № 6 (б) (цилиндрическая боковая поверхность с ЭИП) после испытаний

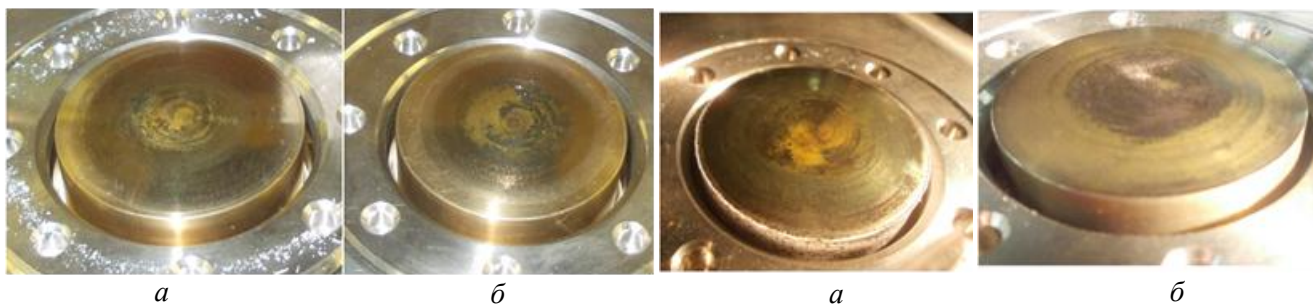


Рис. 14. КЭИН № 10 (а) и № 13 (б) (коническая боковая поверхность с ЭИП) после испытаний

Рис. 15. КЭИН № 1 (а) и № 8 (б) (коническая боковая поверхность с ЭИП) после испытаний

Результаты испытаний КЭИН (ЭИП на конической боковой поверхности):

- подтверждена работоспособность ЭИП для всех режимов циклического нагружения;
- на контактных (металлических) поверхностях КЭИН возникают продукты фреттинга, которые не влияют на электроизолирующие свойства покрытия;
- использование конической боковой поверхности позволяет уменьшить размеры паза под КЭИН в НКПС и обеспечить самопозиционирование КЭИН в указанном пазе.

Испытания центрального болта с элементами стопорения резьбы. Для экспериментального обоснования работоспособности центрального болта и системы законтривания его резьбы были разработаны и изготовлены полномасштабные макеты болта, конической втулки и сферической шайбы.

Для установки болта в захваты испытательных машин была спроектирована и изготовлена испытательная оснастка. Перед установкой в оснастку проводилось законтривание болта путём затяга конической втулки заданным моментом с использованием динамометрического ключа (рис. 16). На тыльной

поверхности конической втулки выполнялись четыре риски, фиксирующие положение втулки после затяга, измерялся размер *a* от торца конической втулки до торца болта (см. рис. 16).

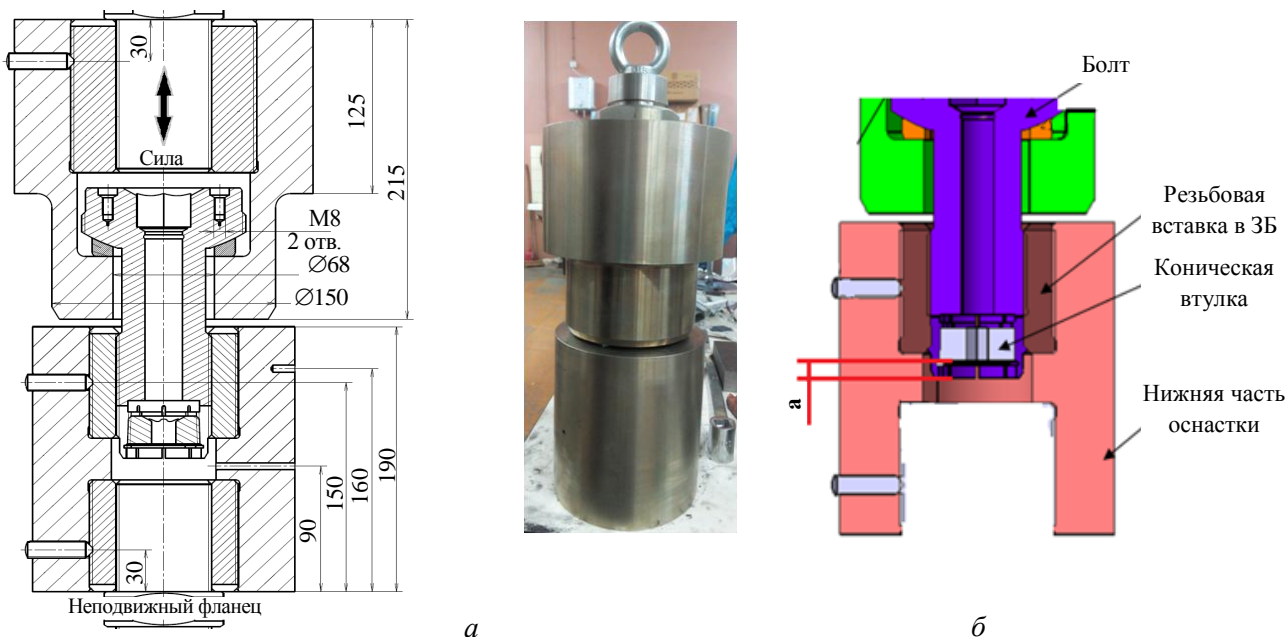


Рис. 16. Испытательная оснастка (а) и схема нагружения болта (б)



Рис. 17. Комплект деталей испытательной оснастки (а) и объект испытаний (б)

Перед испытаниями на все резьбовые соединения было нанесено антисхватывающее покрытие DRY MOLY «PASTE» фирмы ROCOL (Великобритания) на основе MoS₂ (рис. 17).

На первом этапе проводились циклические механические испытания болта при нормальных условиях, при атмосферном давлении. Испытания проводились на сервогидравлической испытательной машине Instron 8806, условия испытаний следующие:

Температура испытаний, °С . . .	25 ± 10
Характер нагружения, кН . . .	Осевая сила 600/150
Частота изменения силы, Гц . . .	Не более 0,5
Количество циклов . . .	15 000
Коэффициент трения в резьбе . . .	0,1—0,15
Момент затяга конической втулки, Нм . . .	300—500

Результаты измерения размера *a* (см. рис. 16) и значения момента затяга конической втулки в процессе испытаний представлены в табл. 6.

Т а б л и ц а 6. Результаты измерений размера *a* и момента затяга конической втулки

Параметр	Болт № 8	Болт № 6	Болт № 7
<i>a</i> , до затяга конической втулки, мм	8,74	8,32	9,62
<i>a</i> , после затяга конической втулки, мм	11,54	10,48	11,57
Момент затяга конической втулки, Нм	400	550	550
<i>a</i> , после испытаний конической втулки, мм	11,52	10,28	11,52
Количество проведённых циклов	15 000	15 000	15 000

При испытаниях не зафиксировано самопроизвольное откручивание болта или конической втулки. Повреждений и разрушений объекта испытаний и оснастки не выявлено. Пример диаграммы «нагрузка-

перемещение» для первых 10, 3000-го, 5000-го, 10 000-го и 14 990—15 000-го циклов нагружения для болтов № 6 и № 8 представлен на рис. 18.

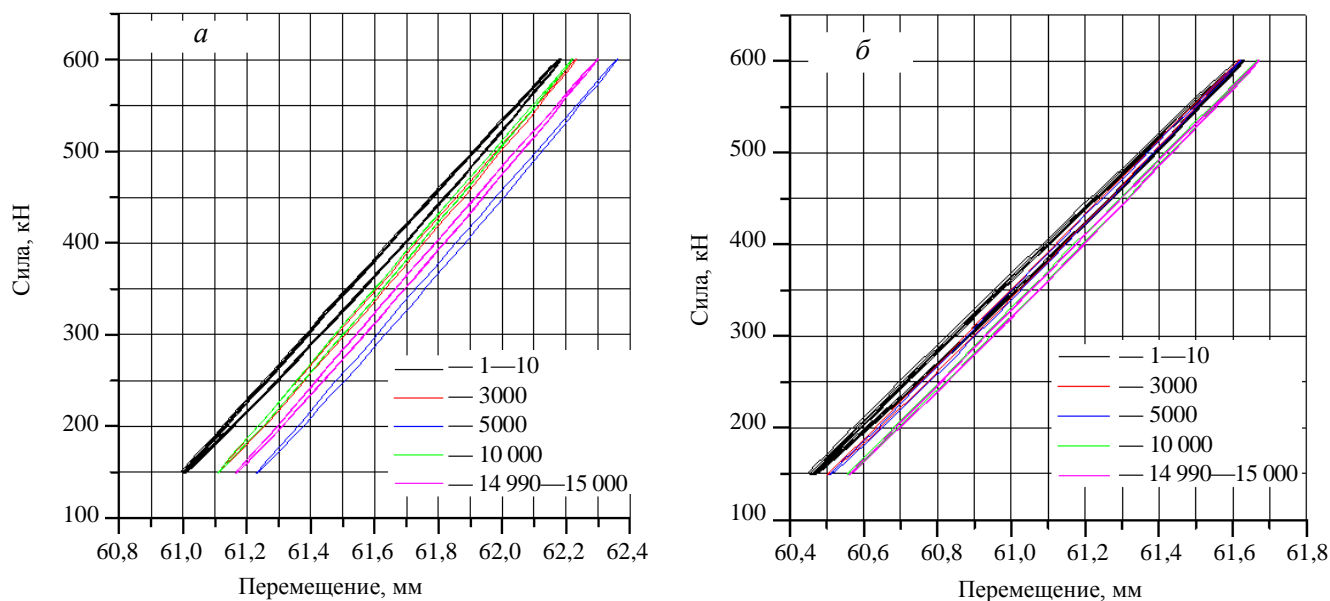


Рис. 18. Диаграммы нагружения при испытаниях болтов № 8 (а) и № 6 (б)

Далее были проведены циклические механические испытания болта при атмосферном давлении, температуре 270 °С на сервогидравлической испытательной машине Instron 8802, оснащённой термокамерой. Условия испытаний следующие:

Температура испытаний, °С . . .	270 ± 10
Характер нагружения, кН . . .	Осевая сила 250/50
Частота изменения силы, Гц . . .	Не более 2
Количество циклов . . .	15 000
Коэффициент трения в резьбе . . .	0,1—0,15
Момент затяга конической втулки, Нм . . .	300—500

Задание температуры испытания выполнялось от температурного контроллера термокамеры. Измерение рабочей температуры объекта (болта) фиксировалось с помощью термопары типа хромель-алюмель (ХА), установленной в оснастке в непосредственном контакте с болтом. Так как испытательная оснастка имеет значительные размеры и, следовательно, большую теплоёмкость, то выход на заданную температуру болта происходил с задержкой около двух часов после выхода на заданную температуру атмосферы в камере. На рис. 19 показаны диаграммы изменения температуры в пространстве термокамеры и на испытуемом объекте. Для ускорения выхода на заданную температуру в термокамере устанавливалась температура, превышающая номинальную в пределах допуска.

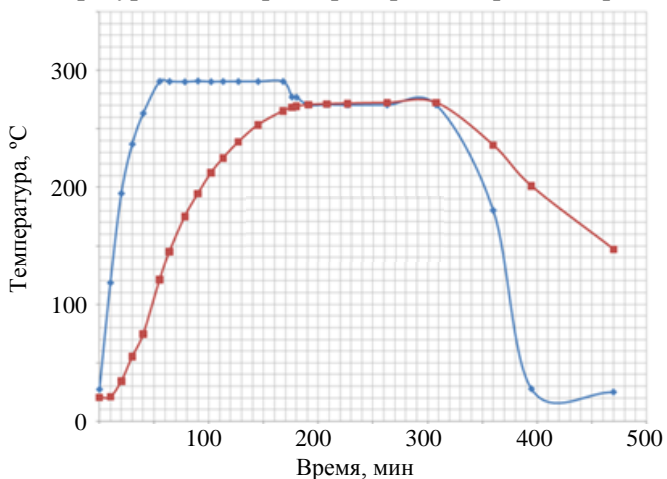


Рис. 19. Температурные диаграммы при испытаниях: ■ — в термокамере; ■ — на образце

Результаты измерения размера *a* (см. рис. 16)

и значения момента затяга конической втулки в процессе испытаний представлены в табл. 7.

Т а б л и ц а 7. Результаты измерений размера *a* и момента затяга конической втулки

Параметр	Болт № 8	Болт № 7
<i>a</i> , до затяга конической втулки, мм	8,95	9,63
<i>a</i> , после затяга конической втулки, мм	11,97	11,63
Момент затяга конической втулки, Нм	350	400
<i>a</i> , после испытаний конической втулки, мм	11,85	11,69
Количество проведённых циклов	15 000	15 000

При испытаниях не обнаружено самопроизвольного откручивания болта или конической втулки. Повреждений и разрушений объекта испытаний и оснастки не выявлено. Пример диаграммы «нагрузка-перемещение» для первых 10, 3000-го, 5000-го, 10 000-го и 14 990—15 000-го циклов нагружения для болтов № 7 и № 8 показан на рис. 20.

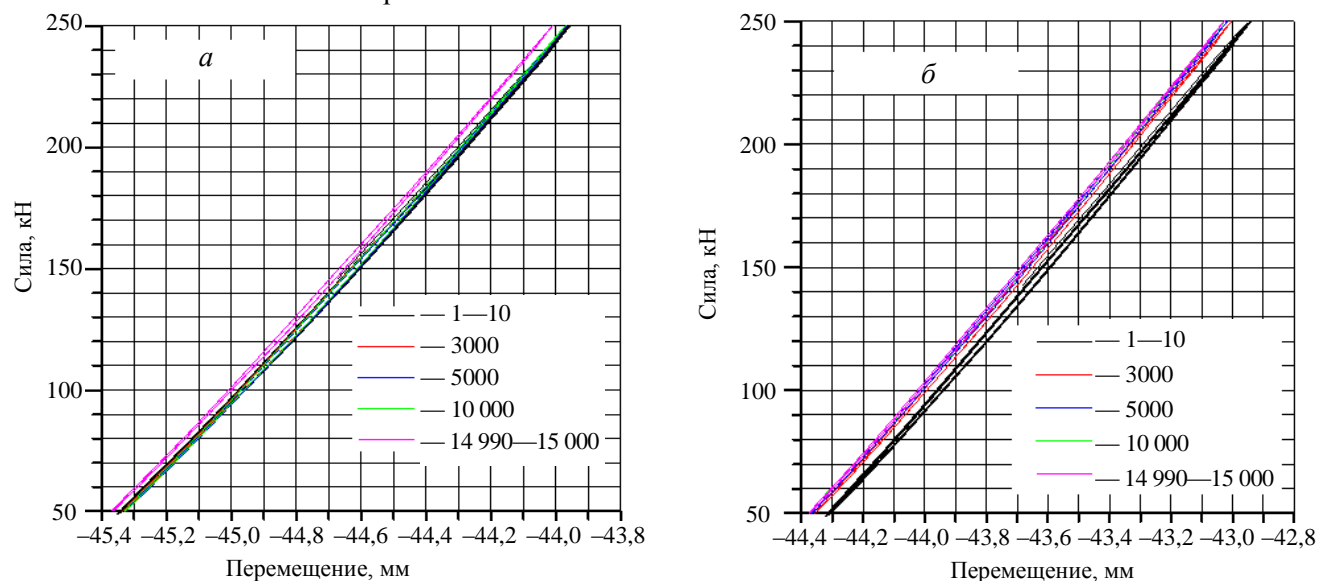


Рис. 20. Диаграммы нагружения при испытаниях болтов № 7 (а) и № 8 (б), 270 °С

Проведён первый этап термовакуумных испытаний, условия испытаний следующие:

Температура испытаний, °С . . .	270 ± 10
Характер нагружения, кН . . .	Осевая сила 600
Коэффициент трения в резьбе . . .	0,1—0,15
Момент затяга конической втулки, Нм . . .	550

Перед испытанием на резьбовые соединения было нанесено антисхватывающее покрытие фирмы ROCOL на базе MoS₂ в виде спрея.

Коническая резьбовая втулка установлена в тело болта до затяга болта в оснастку. Осевое смещение втулки 2,7 мм, момент на ключе составил 550 Н·м, при этом зафиксировано увеличение диаметра резьбовой перфорированной части болта на 0,5 мм. Затяг болта выполнялся с помощью гидравлического ключа фирмы Hutorc (США) (рис. 21). Момент на ключе при затяге болта составил 6,3 кН·м (давление 270 бар).



Рис. 21. Затяг болта в испытательной оснастке

Результаты измерения размера *a* (см. рис. 16) и значения момента затяга конической втулки в процессе испытаний представлены в табл. 8.

Т а б л и ц а 8. Результаты измерений размера *a* и момента затяга конической втулки

Параметр	Болт № 5
<i>a</i> , до затяга конической втулки, мм	6,35
<i>a</i> , после затяга конической втулки, мм	9,05
Момент затяга, кНм	6,3
<i>a</i> , после испытаний, мм	9,08
Количество циклов	18

Кривые изменения температуры и давления в вакуумной камере показаны на рис. 22.

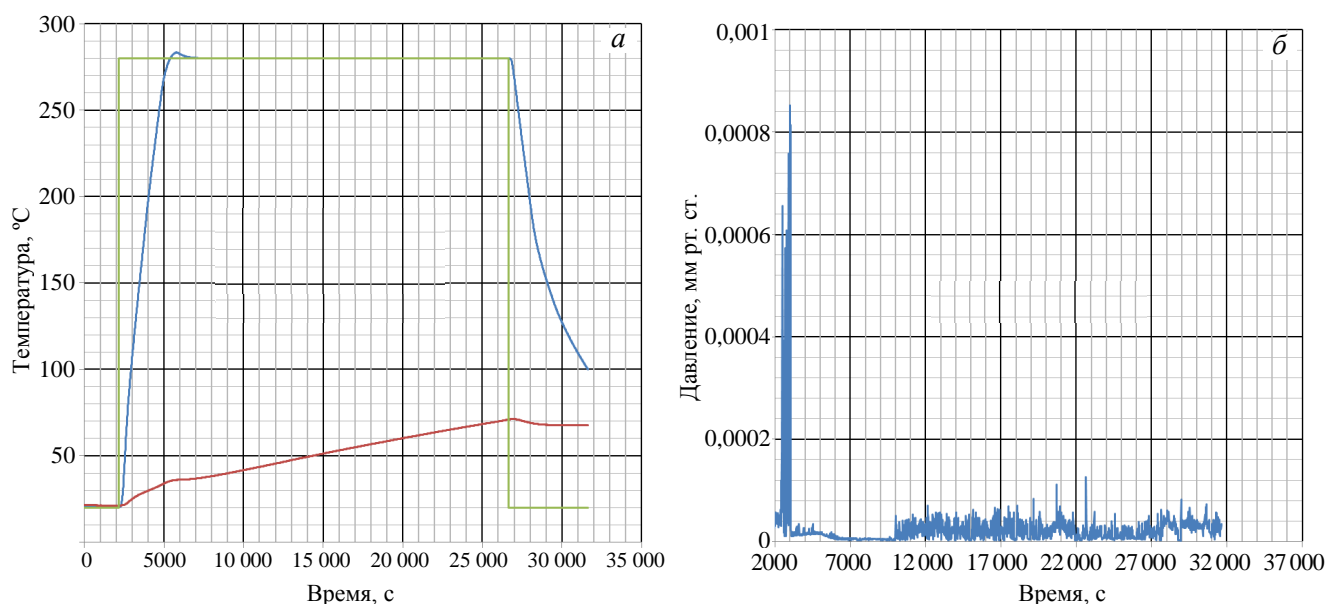


Рис. 22. Изменения во времени температуры и давления в вакуумной камере: *a* — изменение температуры во времени: — — термоплита, — — головка болта, — — заданная температура; *б* — измеренное давление во времени (—)

Разборка оснастки была выполнена тем же моментом, при этом момент на ключе при откручивании конической втулки составил 1 кН·м. Также следует отметить, что покрытие на конической втулке было повреждено при откручивании (рис. 23), что объясняется наличием пазов размером 2 мм в перфорированной части болта.

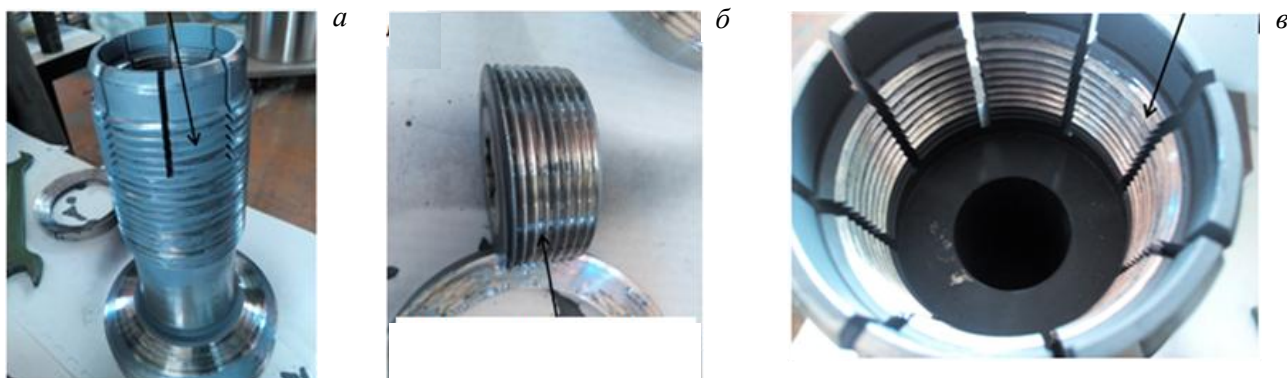


Рис. 23. Элементы системы крепления после испытания: *a* — АС/УТ-покрытие на резьбе болта; *б, в* — покрытие повреждено при откручивании конической втулки

При испытаниях не обнаружено самопроизвольного откручивания болта или конической втулки, повреждений и разрушений объекта испытаний и оснастки не выявлено.

Далее вакуумные испытания были повторены только для болта, конической втулки и резьбовой вставки в защитный блок. На все резьбовые поверхности было нанесено покрытие DRY MOLY paste фирмы ROCOL на основе MoS_2 в виде пасты. Болт, коническая втулка и резьбовая вставка перед испытаниями показаны на рис. 24. Момент затяга конической втулки составил 550 Н·м, осевое перемещение 2,7 мм.



Рис. 24. Элементы системы крепления перед испытанием

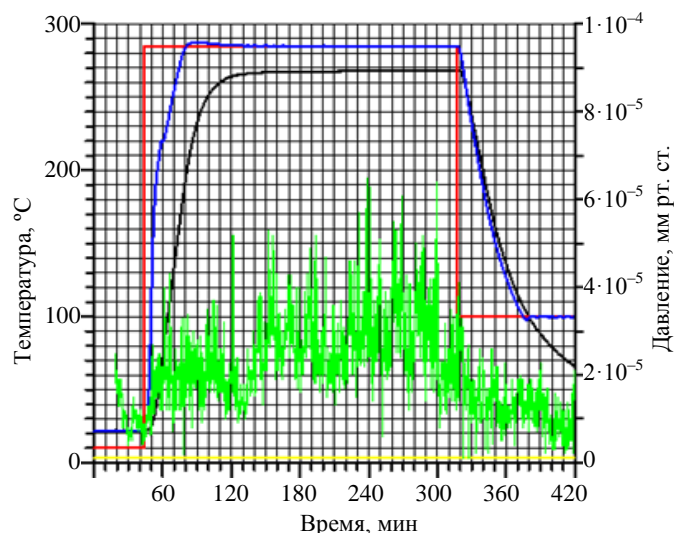


Рис. 25. Диаграмма термовакуумных испытаний: — — головка болта; — — заданная температура; — — термоплита; — — заданное давление; — — измеренное давление



Рис. 26. Элементы системы крепления после испытания

торское решение в установках с более высоким флюенсом нейтронов следует с учётом конкретных регламентов эксплуатации и действующих нагрузок.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана система механического крепления ППС и интегрирована в конструкцию ППС, входящих в поставочный комплект Российской Федерации.

По результатам расчётного обоснования температуры в элементах конструкции не превышают допускаемых, принятых для используемых конструкционных материалов.

Проведённые экспериментальные исследования подтвердили работоспособность элементов системы механического крепления.

В перспективе необходимо выполнить вибрационные испытания системы законтривания резьбы центрального болта.

REFERENCES

1. Raffray A.R. et al. Overview of the design and R&D of the ITER blanket system. — FED, 2012, vol. 87, pp. 769—776.

Было выполнено 24 цикла, типовая диаграмма цикла представлена на рис. 25.

Откручивание конической втулки было выполнено тем же моментом (550 Н·м), при этом покрытие на гайке было также повреждено при откручивании, что объясняется наличием пазов размером 2 мм в перфорированной части болта.

При проведённых циклических термовакуумных испытаниях при различных условиях нагружения не обнаружено самопроизвольного откручивания болта или конической втулки, также не выявлено повреждений и разрушений объекта испытаний. Болты № 7, № 8 прошли 30 000 нагружений без повреждений и разрушений. Болт № 5 прошёл 42 цикла нагружения в вакууме (рис. 26).

В процессе испытаний подтверждена работоспособность системы законтривания резьбы при циклических механических и температурных нагрузках. В перспективе необходимо продолжить циклические термовакуумные испытания, а также выполнить вибрационные испытания для всестороннего обоснования работоспособности элементов системы механического крепления ППС в условиях ИТЭР.

Также следует отметить, что регламент эксплуатации предписывает полностью заменять ППС после эксплуатации, таким образом, в случае невозможности выполнить разборку резьбовых соединений болт будет удалён механическими способами, а панель ПС отправлена в горячие камеры.

Тем не менее применять данное конструк-

2. **Blanket** System Load Specification (3NSGK2), vol. 2.1.
3. **Sviridenko M.N. et al.** Analyses results of the EHF FW panel with welded fingers. — FED, 2014, vol. 89, pp. 937—948.

AUTHORS

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

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

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

Tomilov S.N. Joint Stock Company «N.A. Dollezhal Research and Development Institute of Power Engineering», ul. M. Krasnosel'skaya 2/8, 107140 Moscow, Russia; tomilov@nikiet.ru

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

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

Received 8 October 2015
Problems of Atomic Science and Technology
Ser. Thermonuclear Fusion, 2016, vol. 39, issue 2, pp. 29—43.