

РАСЧЕТНОЕ ОБОСНОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ КАРТРИДЖА ГИБКОЙ ОПОРЫ ВНУТРЕННЕГО БЛАНКЕТА ИТЭР ПРИ АВАРИЙНОМ РЕЖИМЕ РАБОТЫ

Никулин Б.И., Поддубный И.И., Свириденко М.Н., Данилов И.В. (АО «НИКИЭТ»,
Москва, Россия), Путрик А.Б. (ЧУ «ИТЭР-Центр», Москва, Россия)

Введение

Реактор-токамак ИТЭР является важнейшей ступенью перед созданием демонстрационного термоядерного реактора и должен стать прототипом будущих термоядерных установок. Его защитный бланкет состоит из 440 модулей, каждый из которых включает в себя защитный блок (ЗБ) и панели первой стенки (ППС). Модули бланкета (МБ) устанавливаются на внутренней стенке вакуумной камеры (ВК) посредством четырех гибких опор (ГО) [1]. Они воспринимают механические нагрузки, вызванные действием электромагнитных сил, индуцируемых при срывах плазмы; компенсируют термические деформации МБ; обеспечивают электрическую изоляцию МБ и ВК.

В процессе эксплуатации на сборку ГО действуют циклически изменяющиеся тепловые и механические нагрузки, поэтому расчетное обоснование конструкции сборки ГО, а также ее отдельных компонентов в нормальных и аварийных условиях, когда ток проходит через опору при разрушении электроизоляции, необходимо для дальнейшего проектирования реактора.

В рамках работы исследуется работоспособность модернизированной конструкции сборки ГО при отсутствии шлифовки поверхностей с электроизоляционным покрытием (ЭИП) в нормальном режиме работы согласно нормам статической и циклической прочности, а также демонстрируется возможность раскрытия стыка на интерфейсе «коническая втулка-картридж», что может привести к пробою ЭИП, сопровождающемуся протеканием тока по опоре. На втором этапе исследуется работоспособность картриджа ГО в условиях аварийной эксплуатации, когда по сборке протекает электрический ток: оценивается омический нагрев и индуцируемые электромагнитные силы, а также время остывания картриджа до рабочих температур и предельный фактор нагрузки.

1. Конструкция сборки ГО

Специалистами АО «НИКИЭТ» была разработана модернизированная конструкция сборки ГО внутреннего бланкета, представленная на рисунке 1а. Ее главным элементом является картридж, выполненный из сплава 718 и представляющий собой полый цилиндр диаметром 140 мм с двумя фланцами. Нижний – соединяется с корпусом ВК резьбой М150×4, верхний – ЗБ с помощью системы «болт-гайка». Центральная часть картриджа перфорирована аксиальными прорезями, образующими ряд из 18 спиц длиной 130 мм с практически прямоугольным сечением 8 мм на 13 мм. На торец конусной втулки и внешнюю поверхность гайки нанесено ЭИП на базе оксида алюминия. Материалы, используемые для изготовления деталей узла ГО представлены в таблице 1. Их свойства приведены в [2].

Таблица 1

Материалы деталей узла сборки ГО

Детали	Материал
Картридж, шайбы	Сплав 718
Центральный болт, конусная гайка	Сталь марки 1.4980 (Grade 660)
Крышка, палец, кольцо, ЗБ, ВК	Сталь марки 1.4404 (type 316L)
Конусная втулка, винт крышки крепления	Никель-алюминиевая бронза (NiAl-бронза)

Численное моделирование сборки производится с помощью многофункционального кода Ansys APDL. Конечно-элементная модель (КЭМ) с упорядоченной призматической сеткой сборки ГО представлена на рис. 1б. В КЭМ добавлен фрагмент ЗБ для приложения

внешних нагрузок и фрагмент посадочного гнезда ВК для моделирования лучистого теплообмена, изготовленных из стали марки 1.4404.

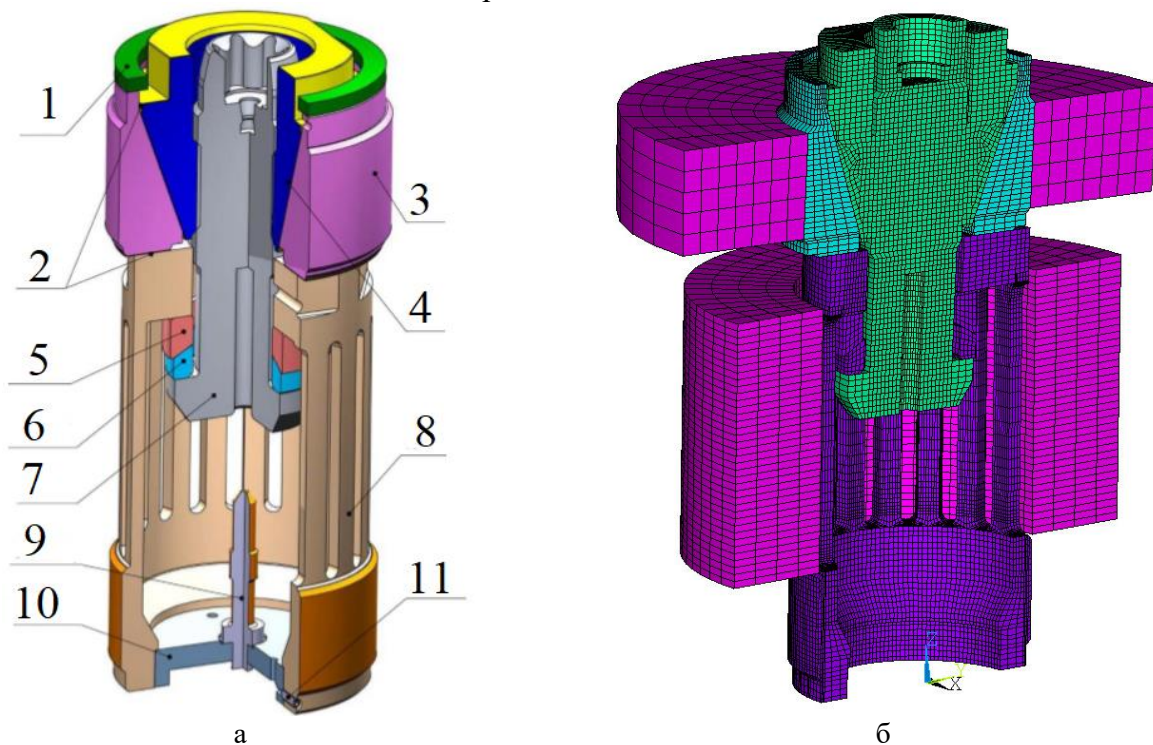


Рис. 1. Конструкция (а) и КЭМ (б) сборки ГО:

1 – кольцо; 2 – ЭИП; 3 – конусная втулка; 4 – конусная гайка; 5 – конусная шайба;
6 – сферическая шайба; 7 – центральный болт; 8 – гибкий картридж;
9 – палец; 10 – крышка; 11 – винт

2. Нормальный режим эксплуатации

2.1. Расчет температурных полей сборки ГО

В рамках теплового анализа рассматривается индуктивный режим работы реактора – Inductive I. Он представляет собой периодическую последовательность фаз горения (импульса) плазмы с нейтронным потоком $0,78 \text{ МВт/м}^2$, эмитируемым на ППС, в течение 450 с и паузы в течение 1800 с [3]. При этом температура ГО не должна превышать 600°C .

В рамках упрощения технологического процесса планируется не шлифовать поверхности, покрытые керамикой. Поэтому тепловой анализ производится для двух значений контактной проводимости: $200 \text{ Вт/(м}^2\cdot^\circ\text{C)}$, соответствующему нешлифованному ЭИП и $1000 \text{ Вт/(м}^2\cdot^\circ\text{C)}$, соответствующему шлифованному ЭИП.

В качестве граничных условий (ГУ) на резьбовой поверхности нижнего фланца картриджа принимается постоянная температура 100°C , равная температуре охлаждающей МБ воды, на внешней поверхности втулки – температура 130°C , равная температуре ЗБ [3]. За НУ принимается однородная по объему ГО температура 100°C . На интерфейсе «конусная гайка – болт» задается величина контактной проводимости, равная $500 \text{ Вт/(м}^2\cdot^\circ\text{C)}$. На остальных интерфейсах задается идеальный тепловой контакт (рисунок 2б).

Нейтронное тепловыделение имеет экспоненциально спадающий от МБ к ВК вид, его распределение представлено на рисунке 2а согласно проведенным МО ИТЭР нейтронно-физическим расчетам.

Результаты расчета представлены на рисунках 3 и 4 в виде полей температуры по сборке ГО в фазах импульса и паузы для двух значений контактной проводимости ЭИП. Стабилизация температур достигается после 10 циклов «импульс-пауза».

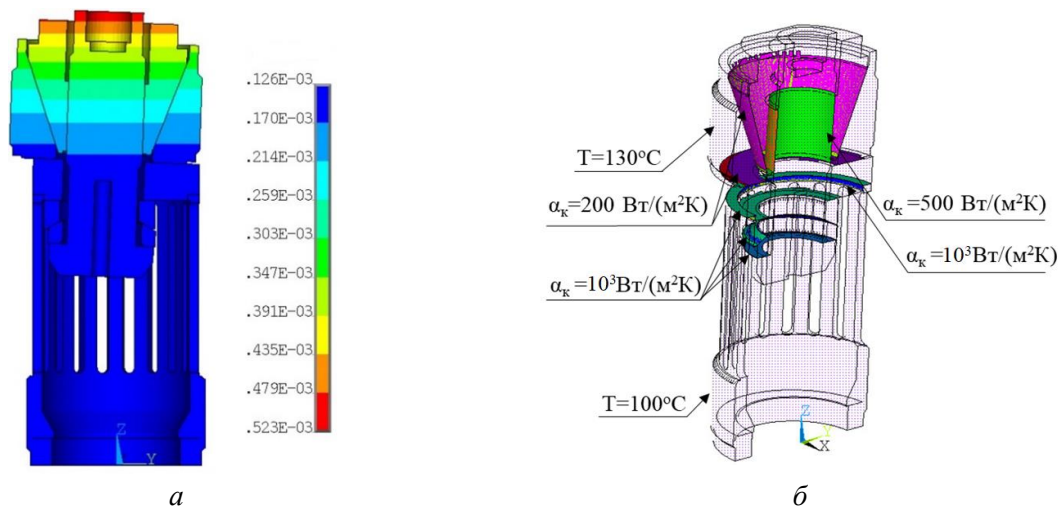


Рис. 2. Нагрузки теплового анализа сборки ГО:
 а – поле нейтронного тепловыделения, Вт/мм³; б – ГУ и условия сопряжения

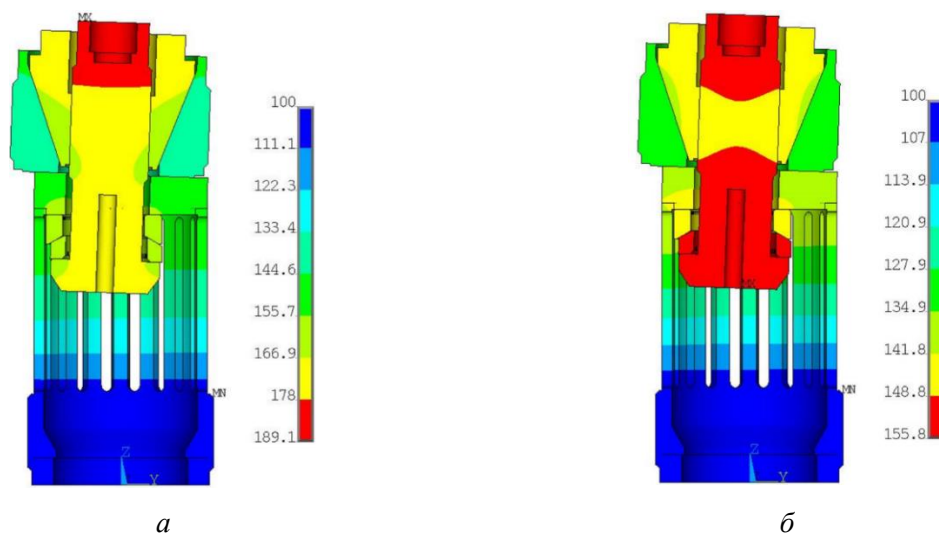


Рис. 3. Температурное поле сборки ГО при контактной проводимости ЭИП 200 Вт/(м²·°C) в режиме Inductive I, °C:
 а – горение; б – пауза

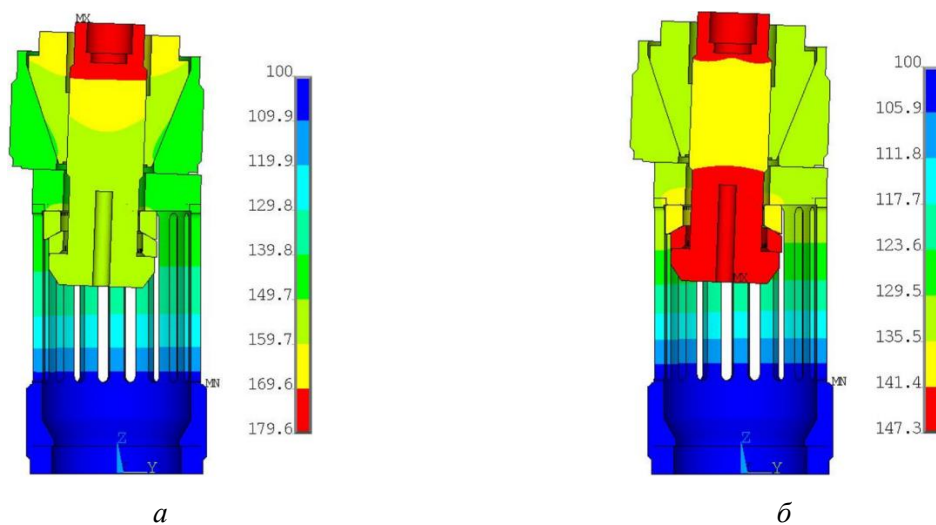


Рис. 4. Температурное поле сборки ГО при контактной проводимости ЭИП 1000 Вт/(м²·°C) в режиме Inductive I, °C:
 а – горение; б – пауза

В варианте расчета с проводимостью ЭИП 200 Вт/(м²·°C) максимальная температура достигает 189 °C на носике болта в режиме горения, в режиме паузы максимум температуры находится на головке болта, где температура достигает значения 156 °C. В свою очередь, в варианте расчета с проводимостью ЭИП 1000 Вт/(м²·°C) максимальная температура достигает 180 °C в режиме горения и 147 °C в режиме паузы в тех же местах. Максимальная температура в картридже достигает 156 °C в режиме импульса. Температуры не превышают допустимые значения.

Шероховатая ЭИП способствует возрастанию температур в сборке ГО менее, чем на 10 °C, что не приводит к существенному увеличению термических напряжений в конструкции, поэтому шлифовка ЭИП нецелесообразна.

2.2 Расчет НДС и анализ прочности картриджа ГО

В процессе эксплуатации на картридж ГО действуют циклические механические и тепловые нагрузки и нейтронный поток. Последний помимо энерговыделения в материалах приводит к изменению механических свойств. Применительно к сплаву 718 нейтронной облучение с дозами 0,1–0,5 сна в диапазоне эксплуатационных температур 100–300 °C. снижает пластические свойства [4], что учтено в [2], где механические свойства указаны с запасом относительно своих минимальных значений. В свою очередь, комбинация тепловых и механических нагрузок обобщена в спецификацию циклического нагружения картриджа ГО, представленную согласно [3] в таблице 2 и разделенную на несколько сценариев (load case – LC): LC 1, LC 2, LC 3. На картридж действуют тороидальные (U_x) и полоидальные (U_y) перемещения и поворот верхнего фланца относительно тороидальной оси (R_x), вызванные тепловым расширением ЗБ, тороидальные перемещения (U_x), вызванные колебанием ЗБ на ГО под действием электромагнитных сил, и осевые силы (F_z).

Таблица 2

Спецификация нагружения картриджа ГО

Сценарий нагружения	Фаза цикла	U _x , мм	U _y , мм	R _x , мрад	Осевая сила F _z , кН	Требуемое число циклов
LC 1	LC11	0,15	0,25	–1,5	0	30000
	LC12	0	0	1,5	0	
LC 2	LC21	1,75	0,25	–1,5	500	200
	LC22	–1,6	0	0	–500	
LC 3	LC31	1,75	0,25	–1,5	500	200
	LC32	0,15	0,25	–1,5	–500	

Анализ прочности картриджа производится согласно критериям проектных норм прочности SDC-IC [5]. В рамках статической прочности рассматривается критерий IC3121.1 «мгновенный пластический коллапс» в упругой и упругопластической постановках.

В упругой постановке внешнее нагружение задается комбинацией поперечного сдвига U_x = 1,6 мм и осевой силы F_z = 500 кН, которые приводят к возникновению первичных напряжений. Распределение температур для определения свойств принималось равномерным и равным 200 °C, взятым с запасом относительно максимальной температуры картриджа. На резьбовой поверхности тыльного фланца задавались нулевые перемещения (условия закрепления); в плоскости симметрии – нулевое перемещение в направлении нормали к поверхности (условия симметрии).

На рисунке 5 приведены результаты линеаризации эквивалентных напряжений вдоль линии, содержащей максимум, который достигается в зоне корня паза спицы. Мембранные эквивалентные напряжения составляют 867,5 МПа при допускаемых 425 МПа, а сумма мембранных и изгибных эквивалентных напряжений составляет 1072,7 МПа при допускаемой 637,5 МПа, следовательно, требования критерия IC3121.1.1 «мгновенный пластический коллапс» не выполняются, поэтому был проведен дополнительный расчет в упругопластической постановке.

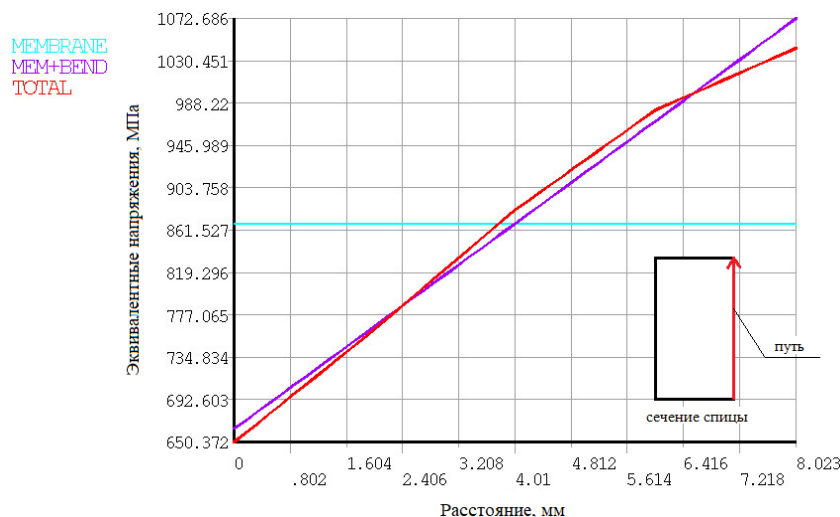


Рис. 5. Результаты линейзации эквивалентных напряжений

В упругопластическом анализе внешнее нагружение задавалось в виде комбинации линейно возрастающей осевой сжимающей силы от нулевого до четырехкратного номинального значения и постоянного в течение всей кампании поперечного сдвига 1,6 мм. Аналогично упругому анализу были заданы условия закрепления и симметрии.

Результаты определения предельной осевой силы сжатия представлены на рисунке 6. Ее величина составляет 1903 кН.

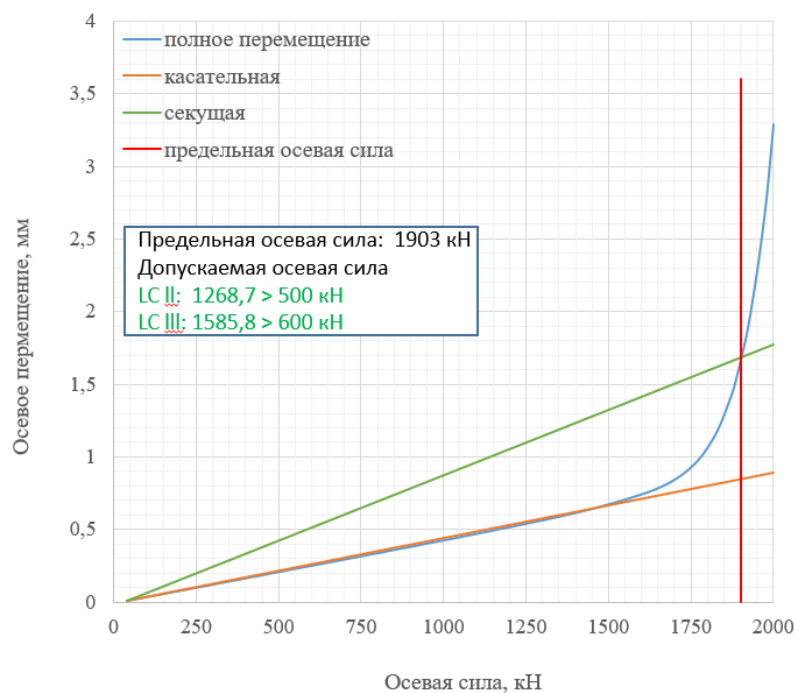


Рис. 6. Определение предельной сжимающей осевой силы, кН

Результаты оценки допускаемых значений силы представлены в таблице для двух категорий нагружения Load Category II и Load Category III (LC II и LC III). Первая соответствует событию Fast VDE II с осевой силой 500 кН, вторая – Slow VDE III с силой 600 кН. Проектные значения осевой силы не превышают допускаемые при обеспечении необходимых запасов. Следовательно, требования критерия IC3121.1 «мгновенный пластический коллапс» выполняются для двух категорий нагружения LC II и LC III.

В рамках циклической прочности картриджа ГО рассматривается критерий IC3132.2 time-independent fatigue. Внешние нагрузки задаются согласно разработанной спецификации. При этом для анализа приспособляемости к циклическому нагружению было проведено несколько циклов.

В таблице 4 приведены результаты анализа циклической прочности картриджа ГО.

Таблица 3

Результаты анализа статической прочности картриджа ГО

Категория нагружения	Предельная сила, кН	Коэффициент запаса	Допускаемая сила, кН	Проектная сила, кН
LC II	1903	1,5	1268,7	500
LC III		1,2	1585,8	600

Таблица 4

Результаты анализа циклической прочности картриджа ГО

Сценарий нагружения	$\Delta \varepsilon_{tot}$, %	N	A
LC 1	0,2025	$(>10^6) > 30000$	$0,015 < 1$
LC 2	1,3674	$370 > 200$	$0,540 < 1$
LC 3	0,7589	$2269 > 200$	$0,088 < 1$
Σ	–	–	$0,643 < 1$

$\Delta \varepsilon_{tot}$ – эквивалентный размах полных напряжений в цикле
N – число циклов (определяется по кривой малоциклового усталости сплава 718)
A – накопленное усталостное повреждение

Накопленное усталостное повреждение составляет 64,3%, не превышая 100%. Следовательно, требования критерия IC3132.2 «time-independent fatigue» выполняются по совокупности трех рассмотренных сценариев. Однако необходимо дальнейшее проведение анализа НДС методом субмоделирования в упругопластической постановке с целью уточнения полученных результатов, которое заключается в переходе от глобальной КЭМ к локальной, сосредоточенной в окрестности критической точки – в корне паза в зоне тыльного фланца как точке, наиболее подверженной циклическому разрушению. В качестве ГУ задаются ненулевые перемещения, полученные путем интерполяции результатов расчета НДС, проведенного на глобальной КЭМ.

Для субмоделирования была построена локальная КЭМ (рисунок 7).

Анализ усталостной прочности картриджа ГО по результатам расчета НДС методом субмоделирования показал, что полное усталостное повреждение составляет 80,1%, не превышая 100% (таблица 5). Следовательно, требования критерия IC3132.2 «time-independent fatigue» выполняются по совокупности трех рассмотренных сценариев.

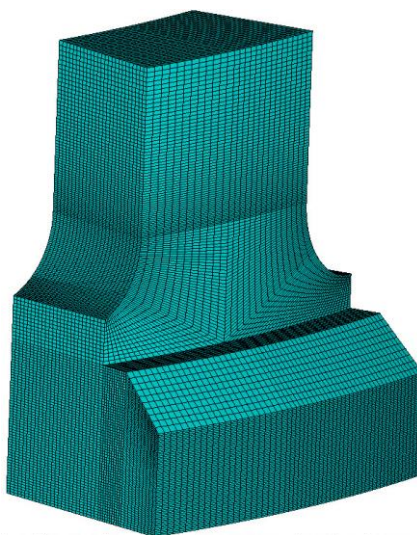


Рис. 7. Локальная КЭМ картриджа ГО для проведения усталостного анализа методом субмоделирования

Результаты анализа циклической прочности картриджа ГО методом субмоделирования

Сценарий нагружения	$\Delta \varepsilon_{tot}$, %	N	A
LC 1	0,237	$(>10^6) > 30000$	$0,017 < 1$
LC 2	1,4743	$294 > 200$	$0,681 < 1$
LC 3	0,7981	$1938 > 200$	$0,103 < 1$
Σ	—	—	$0,801 < 1$
$\Delta \varepsilon_{tot}$ – эквивалентный размах полных напряжений в цикле			
N – число циклов (определяется по кривой малоциклового усталости сплава 718)			
A – усталостное повреждение			

Таким образом, конструкция картриджа ГО удовлетворяет требованиям критериев статической и циклической прочности норм SDC-IC в нормальном режиме работы.

2.3 Расчет НДС сборки ГО

Согласно рекомендациям МО ИТЭР предварительное усилие затяга болта варьируется в диапазоне 600–1200 кН. Для определения возможности раскрытия стыка на интерфейсе «коническая втулка-картридж» был проведен расчет НДС сборки ГО. Внешнее нагружение задавалось последовательностью 7 шагов:

- 1) усилие предварительного затяга болта 600 кН при температуре 20°C;
- 2) разогрев ВК до 100 °C;
- 3) окончание фазы «горение» режима Inductive I (рисунок 3а);
- 4) окончание фазы «пауза» режима Inductive I (рисунок 3б);
- 5) поперечное смещение 1,6 мм;
- 6) поворот на 0,085°;
- 7) осевая сжимающая сила 600 кН.

Для величины осевой силы рассматривается сценарий 600 кН, что соответствует максимальной нагрузке ГО (режим срыва плазмы типа Slow VDE III).

На контактирующих поверхностях компонентов ГО задавался коэффициент трения скольжения: на поверхностях, покрытых керамикой – 0,6; покрытых АФП – 0,1. На интерфейсе «коническая гайка-центральный болт», моделирующего резьбовое соединение, был задан тип контактного взаимодействия «Bonded», предполагающий отсутствие раскрытия стыка между контактирующими поверхностями; на всех остальных интерфейсах – тип «Standard», описывающий реальную картину контактного взаимодействия.

Результаты расчета в виде изменения осевого усилия в болте на каждом шаге нагружения представлены в таблице 6.

Таблица 6

Изменение осевого усилия затяга в болте

Шаг нагружения	Осевое усилие в болте, кН
1	600,0
2	562,1
3	532,8
4	504,4
5	500,7
6	501,7
7	506,8

В режиме Inductive I осевое усилие затяга в болте падает до 504 кН, что при совместном действии электромагнитной силы 600 кН и комбинации смещения МБ и разворота фланца ГО приводит к раскрытию стыка на интерфейсе «коническая втулка-картридж», что, в свою очередь, при циклическом режиме работы реактора может привести к разрушению ЭИП, что подтверждается испытаниями, проведенными на базе «НИКИЭТ».

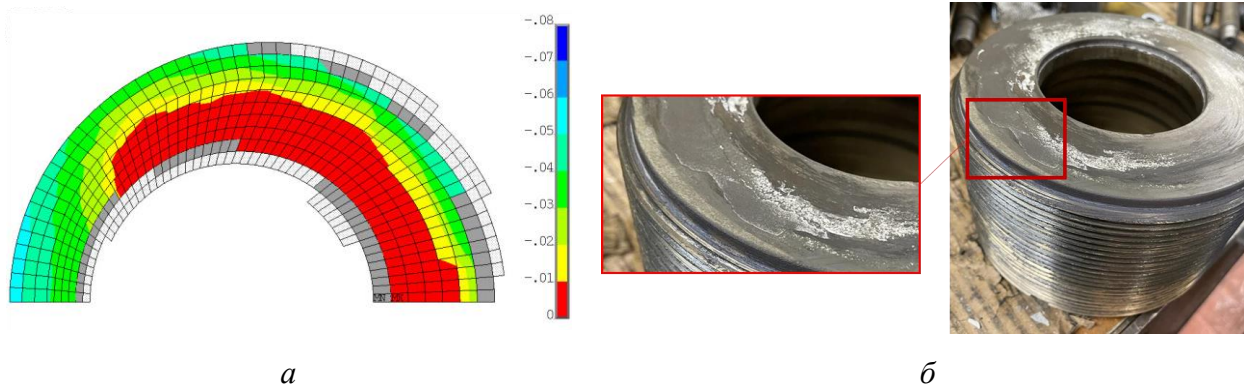


Рис. 8. Раскрытие стыка на интерфейсе «коническая втулка-картридж»:
 а – величина зазора на интерфейсе «коническая втулка-картридж», мм;
 б – скол керамики на поверхности втулки после проведения испытаний

Скол керамики будет сопровождаться протеканием тока по опоре и ее переходу в аварийный режим эксплуатации.

3. Аварийный режим эксплуатации

3.1 Расчет распределения тока

Для получения консервативных оценок в аварийном режиме работы рассматривается событие Slow VDE III с величиной осевой силы 600 кН и протекающего тока 137 кА, длительностью 300 мс [6]. При этом вводится допущение о том, что 2 электросоединителя (ЭС), установленных параллельно сборкам ГО и изготовленных из материала с высокой электрической проводимостью, вышли из строя, весь ток протекает через опоры.

Для моделирования протекания тока по опоре была создана контактная пара в окрестности разрушения ЭИП (рис. 8а) с идеальной электрической проводимостью.

В качестве ГУ на резьбовой поверхности нижнего фланца картриджа задается нулевой потенциал, на внешней поверхности втулки – ток 137 кА. Результаты моделирования представлены на рисунке 9 в виде полей потенциала и джоулева тепловыделения.

Из сравнения рисунков 2а и 9б можно заметить, что джоулево тепловыделение на 3 порядка превышает нейтронное, что приведет к значительному росту температур.

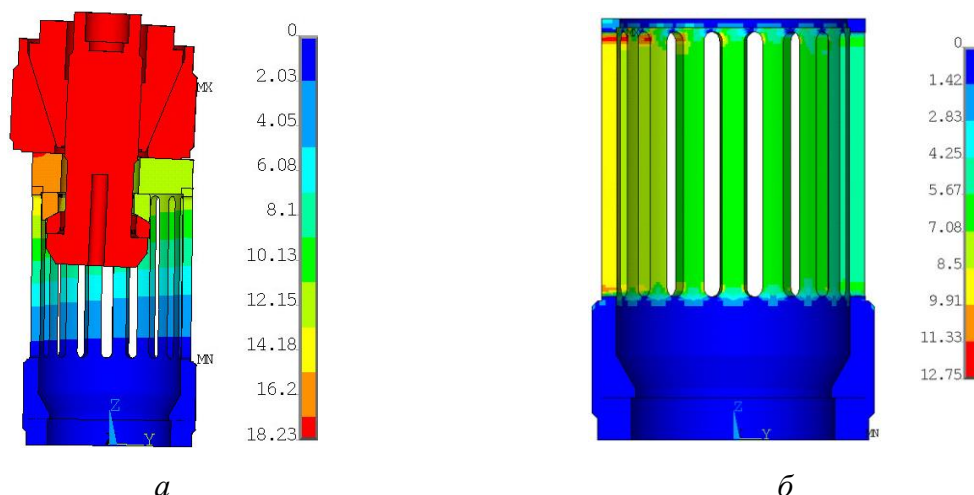


Рис. 9: Результаты расчета распределения токов:
 а – поле электрического потенциала, В; б – поле джоулева тепловыделения, Вт/мм³

3.2 Расчет температурных полей

Полученное распределение тепловыделения накладывается в течение 300 мс в рамках теплового анализа. При этом ГУ и условия сопряжения остаются аналогичными предыдущему расчету. За НУ принимается распределение температуры в конце фазы горения плазмы режима Inductive I (рисунок 3а).

Результаты расчета по окончании события Slow VDE III в виде поля температуры картриджа ГО представлены на рисунке 10б.

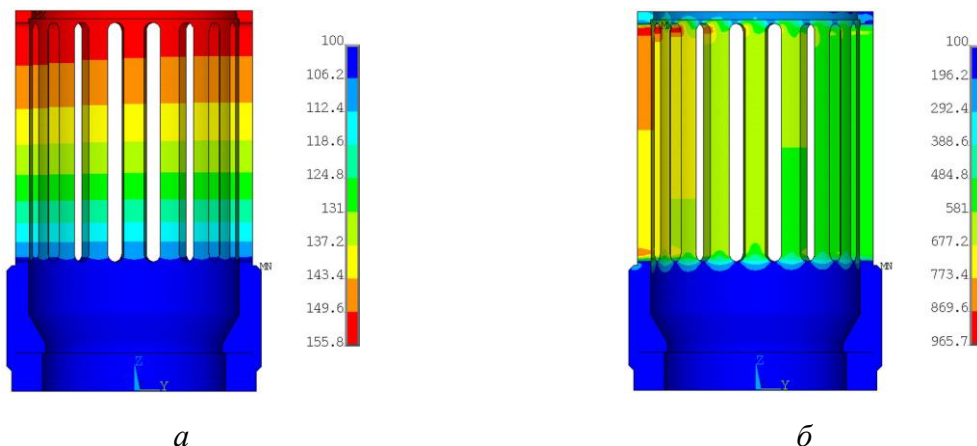


Рис. 10. Распределение температур в картридже ГО, °С:
а – нормальный режим работы; б – аварийный режим работы

Протекание тока по опоре приводит к локальному увеличению максимальной температуры до 966 °С, не превышая температуру плавления сплава 718 1260 °С, и среднему разогреву спиц до 600 °С, что соответствует допускаемой температуре.

Для оценки времени остывания картриджа до рабочих температур в расчетную модель был добавлен фрагмент посадочного гнезда ВК, охлаждаемого водой при температуре 100 °С, куда ввинчивается картридж, вследствие чего образуется зазор 5 мм между спицами и корпусом ВК. Из-за сильно нелинейной зависимости теплового потока излучением от разности температур между корпусом ВК, спицами картриджа и другими компонентами ГО будет осуществляться лучистый теплообмен, интенсифицирующий темп остывания. В качестве ГУ на внешней поверхности посадочного гнезда задавались ГУ 3 рода: коэффициент теплоотдачи 500 Вт/(м²·°С) и температура среды 100 °С [3], ГУ на других поверхностях аналогичны предыдущим расчетам. За НУ принималось распределение температур по окончании события Slow VDE III при пробое ЭИП (рисунок 11б). Результаты представлены на рисунке 11 в виде изменения температуры некоторых точек картриджа со временем.

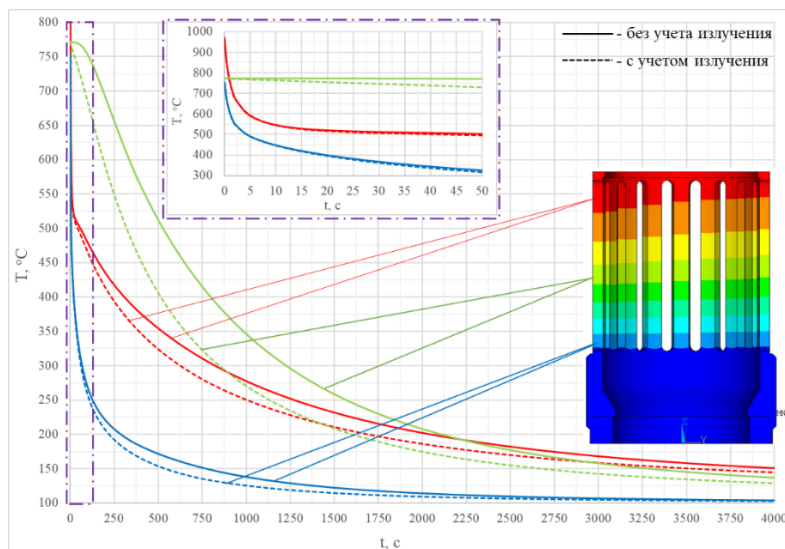


Рис. 11. Изменение температуры некоторых точек картриджа со временем

Время охлаждения картриджа до рабочих температур без учета теплообмена излучением составило 2250 с, а с его учетом – 1500 с. Дальнейшее остывание определяется остыванием ВК. Несмотря на уменьшение времени остывания при учете излучения, оно остается значительным и соответствует времени цикла «импульс-пауза» режима Inductive I. Поэтому возможный следующий срыв приведет к еще большему нагреву картриджа.

3.3 Расчет НДС и анализ прочности картриджа ГО

Помимо омического нагрева протекание тока по спицам картриджа, выступающим в роли проводника с током, в магнитном поле (МП) катушек реактора индуцирует поперечные электромагнитные силы. Компоненты индукции МП катушек равны [3]:

$$\begin{cases} B_{0x} = 9 \text{ Тл} \\ B_{0y} = 1 \text{ Тл} \\ B_{0z} = 1 \text{ Тл} \end{cases}$$

Согласно закону Ампера электромагнитная сила, действующая на объем V , вычисляется по соотношению [7]:

$$\vec{F} = \int_V [\vec{j} \times \vec{B}] dV$$

где $\vec{j}$ – вектор плотности тока, А/м².

Используя найденное распределение плотности тока, можно определить ток, протекающий по каждой спице и силу Ампера, действующую на каждую спицу. Результаты расчета электромагнитных сил представлены в таблице 7, где за первую спицу принята расположенная наиболее близко к месту скола керамики, нумерация производится по часовой стрелке. При этом в таблицу добавлена осевая сила, действующая в режиме Slow VDE III в расчете на одну спицу 600/18 кН.

Таблица 7

Электромагнитные силы, действующие на картридж при пробое ЭИП

Номер спицы	Сила тока, кА	Сила Ампера, кН		
		Вдоль оси X	Вдоль оси Y	Вдоль оси Z
1	8,65	1,13	–10,1	33,3
2	8,37	1,09	–9,80	
3	8,06	1,05	–9,43	
4	7,73	1,01	–9,05	
5	7,45	0,97	–8,72	
6	7,23	0,94	–8,46	
7	7,08	0,92	–8,28	
8	6,99	0,91	–8,18	
9	6,94	0,90	–8,11	

Для оценки напряжений, возникающих при сжатии осевой и изгибе поперечными силами, были использованы соответствующие соотношения [8]:

– для сжатия стержня постоянной силой (S – площадь поперечного сечения спицы):

$$\sigma = \frac{F_z}{S}$$

– для изгиба балки постоянной распределенной нагрузкой в условиях закрепления – жесткая заделка с двух концов (b – ширина спицы, h – высота спицы, l – длина спицы):

$$\sigma_{max} = \frac{F_{x(y)}l}{2bh^2}$$

Результаты расчета напряжений представлены в таблице 8.

Таблица 8

Напряжения, возникающие в спицах при пробое ЭИП

Параметр	Нагрузка вдоль оси X	Нагрузка вдоль оси Y	Нагрузка вдоль оси Z
Максимальная сила, кН	1,13	10,1	33,3
Максимальное напряжение, МПа	88,3	789,2	320,2

Напряжения, возникающие в спицах при нагружении вдоль оси X, составляют 7% от суммарных, что учтено коэффициентом запаса по статической силе 1,2, поэтому силами вдоль оси X можно пренебречь и постановка задачи расчета НДС остается симметричной.

В рамках статической прочности в упругой и упругопластической постановках рассматривался критерий IC3121.1 «мгновенный пластический коллапс».

В упругой постановке внешнее нагружение задавалось поперечным сдвигом 1,6 мм, осевой силой 600 кН и рассчитанными поперечными силами (уровень нагрузок D). Результаты анализа прочности представлены в таблице 9, где также для сравнения указаны результаты для уровня нагрузок A (пункт 3.2) и уровня нагрузок C (внешнее нагружение: поперечный сдвиг 1,6 мм, осевая сила 600 кН, нормальное распределение температур).

Таблица 9

Результаты анализа статической прочности картриджа ГО в упругой постановке

Уровень нагрузок	Мембранная составляющая P_m , МПа		Сумма мембранной и изгибной составляющих $P_m + P_b$, МПа	
	Расчетное	Допускаемое	Расчетное	Допускаемое
A (Fast VDE II)	867,5	425,0	1072,7	637,5
C (Slow VDE III)	942,8	570,0	1155,0	855,0
D (аварийный режим)	1058,0	732,9	1813,0	1099,4

В аварийном режиме наблюдается сильный рост изгибной составляющей напряжений. Требования критерия IC3121.1 не выполняются, поэтому был проведен дополнительный расчет в упругопластической постановке, где внешнее нагружение задавалось постоянным поперечным смещением 1,6 мм и линейно возрастающими от 0 до 4-кратных номинальных значений осевой и поперечными силами. Кривая «максимальное перемещение – фактор нагрузки» представлена на рисунке 12.

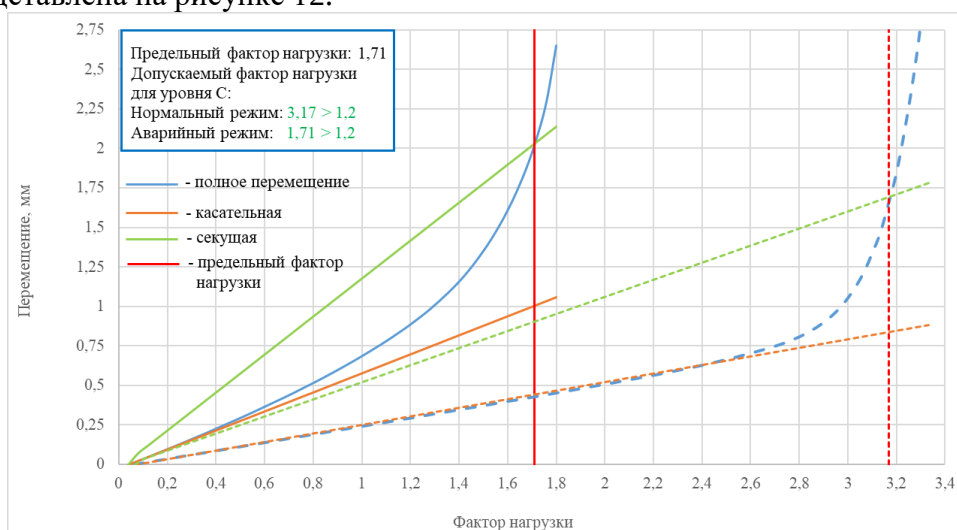


Рис. 12. Определение предельного фактора нагрузки:

— для аварийного режима эксплуатации; — — — для нормального режима эксплуатации

При пробое ЭИП и действии поперечных сил предельный фактор нагрузки уменьшается с 3,17 до 1,71, но превышает 1,2, значит требования критерия IC3121.1.2 выполняются.

Заключение

В рамках работы была расчетно обоснована модернизированная конструкция картриджа ГО: обеспечивается необходимый запас по статической силе и числу циклов согласно проектным нормам SDC-IC, а максимальная температура не превышает допускаемую 600 °С в режиме Inductive I. Однако при статическом нагружении при минимально рекомендуемом предварительном усилии затяга болта 600 кН и действии осевой силы 600 кН на интерфейсе «коническая втулка-картридж» происходит раскрытие стыка, что может привести к разрушению ЭИП, сопровождающемуся протеканием тока по сборке.

В аварийном режиме работы при протекании по ГО тока 137 кА омический нагрев приводит к росту температур в картридже. При этом локально максимальная температура не превышает температуру плавления сплава 718, а средняя температура спиц достигает допустимого значения. Несмотря на это, время остывания картриджа до рабочих температур значительно и составляет 1500 с.

Индуктируемые протеканием тока по спицам картриджа поперечные силы сопоставимы с осевой силой. Расчет общего НДС показал, что запас по статической силе в аварийном режиме обеспечивается.

По итогам выполнения работы составлены рекомендации к эксплуатации ГО:

- 1) Осуществление контроля температур для предупреждения аварийного режима;
- 2) Обеспечение предварительного усилия затяга болта, заведомо гарантирующего условие нераскрытия стыка на интерфейсе «коническая втулка-картридж».

Список литературы

1. Merola M., Escourbiac F., Raffray A.R., Engineering challenges and development of the ITER Blanket System and Divertor. Fusion Engineering and Design, 96-97 (2015) 34–41
2. Appendix A, Materials Design Limit Data. ITER D 222RLN v3.3. ITER Private Communication
3. Blanket System Load Specification. IDM: ITER 3NAGK2 v2.1. ITER Private Communication
4. V. Barabash et al. Materials challenges for ITER – Current status and future activities // Journal of Nuclear Materials. – 2007. – Т.367. – С. 21–32.
5. G. Sannazzaro, V. Barabash, S.C. Kang, Development of design Criteria for ITER In-vessel Components. Fusion Engineering and Design 88 (2013) 2138– 2141
6. I. Poddubnyi, V. Kolganov, V. Elkin et al. Analysis and experimental justification of electrical connector for ITER blanket module. Fusion Engineering and Design 124 (2017) 516–521
7. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Том 3. Электричество. Учебное пособие. – 2009
8. Варданян Г.С. и др. Сопротивление материалов с основами теории упругости и пластичности. – 1995.