

## РАСЧЕТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ СБОРКИ ГИБКОЙ ОПОРЫ БЛАНКЕТА ИТЭР В РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ ЭКСПЛУАТАЦИИ <sup>\*)</sup>

<sup>1</sup>Никулин Б.И., <sup>1</sup>Поддубный И.И., <sup>1</sup>Свириденко М.Н., <sup>2</sup>Путрик А.Б.

<sup>1</sup>АО «НИКИЭТ», Москва, Россия

<sup>2</sup>Частное учреждение «ИТЭР-Центр», Москва, Россия

Бланкет реактора ИТЭР состоит из 440 модулей бланкета (МБ), каждый из которых закреплен на вакуумной камере (ВК) с помощью 4х сборок гибких опор (ГО), главным элементом которых является картридж, представляющий собой полый цилиндр с двумя фланцами: нижний соединяется с корпусом ВК, верхний – с защитным блоком (ЗБ). Для обеспечения электрической изоляции ГО от ВК используется электроизоляционное покрытие (ЭИП) на базе оксида алюминия.

Нормальный режим работы реактора представляет собой периодическую последовательность режимов импульса с нейтронным потоком на внутрикамерные компоненты в течение 450 с и паузы с нулевым энерговыделением в течение 1800 с (режим Inductive I). В данном режиме максимальная температура в сборке ГО достигает 189 °С в центральном болте, тогда как в максимальная температура в картридже – 156 °С.

При срывах плазмы в МБ индуцируются знакопеременные электромагнитные силы, действующие на картридж в осевом направлении, величиной, лежащей в диапазоне 500-600 кН, для двух сценариев срыва плазмы типа Fast VDE II и типа Slow VDE III. Расчет напряженно-деформированного состояния (НДС) картриджа, с учетом комбинации нагрузок в режимах Inductive I и Fast VDE II показал, что конструкция картриджа удовлетворяет нормам статической и циклической прочности SDC-IC.

По требованию МО ИТЭР предварительное усилие затяга болта может варьироваться в диапазоне 600-1200 кН. Расчет НДС сборки ГО показал падение осевого усилия в режиме Inductive I с 600 кН до 504 кН, что при действии осевой силы 600 кН приводит к раскрытию стыка на интерфейсе «коническая втулка-картридж», из-за чего при циклическом режиме работы реактора существует вероятность разрушения ЭИП и перехода в аварийный режим работы бланкета, когда наведенный в МБ ток пойдет через опору.

В режиме Slow VDE III максимальная сила тока достигает 137 кА. Соответствующий омический нагрев, превышающий нейтронный на 4 порядка, в течение 300 мс приводит к сильному локальному возрастанию температуры картриджа до 966°С и среднему разогреву спиц до 600°С. Остывание картриджа с помощью механизма теплопроводности до рабочих температур происходит за 2250 с. Вследствие высокой разности температур между посадочным гнездом ВК, охлаждаемого водой при температуре 100°С, и картриджем лучистый теплообмен между ними снижает время его охлаждения до 1500 с, однако данное значение остается существенным.

Протекание тока по спицам картриджа индуцирует собственное магнитное поле и, как следствие, электромагнитные силы, действующие в поперечном направлении, однако их величина не превышает 250 Н, влияние на общее НДС оказывается незначительным. В свою очередь, величина поперечных сил, индуцированных тороидальной компонентой магнитного поля реактора со значением до 9 Тл, достигает 12,6 кН на одной спице, что сопоставимо с силой, приводящей к потере устойчивости картриджа в поперечном направлении.

Высокие температуры в течение длительного времени приводят к действию значительных термических напряжений, деградации теплофизических и механических свойств, что вкупе с индуцированными электромагнитными силами, действующими на спицы картриджа, могут привести к потере устойчивости картриджа, поэтому необходимо обеспечить предварительное усилие затяга болта сборки ГО, заведомо гарантирующее условие нераскрытия стыка на интерфейсе «коническая втулка-картридж».

<sup>\*)</sup> DOI – тезисы на английском