УДК 621.039.6

ПРОЧНОСТЬ ЦЕНТРАЛЬНОЙ СБОРКИ ДИВЕРТОРА РЕАКТОРА-ТОКАМАКА ИТЭР

А.Б. Алексеев, А.Н. Лабусов, А.Н. Маханьков, М.В. Хохлов (ФГУП «НИИЭФА им. Д.В. Ефремова» (НТЦ «Синтез»), Санкт-Петербург, Россия)

Выполнены расчёты напряжённо-деформированного состояния конструкции центральной сборки дивертора и проведены оценки прочности и ресурса её элементов в соответствии с Нормами ИТЭР. Для расчёта наиболее нагруженных зон были использованы локальные конечно-элементные модели. Исходными данными для локального анализа являлись результаты динамического расчёта всего дивертора при действии нагрузок, вызванных срывами тока плазмы, и результаты расчётов полей температур в элементах конструкции. В результате было выявлено, что прочность и ресурс опор и силовых несущих конструкций дивертора в первую очередь зависят от механических нагрузок, вызванных электромагнитными силами при срывах тока плазмы. Прочность и ресурс теплозащитных элементов дивертора в основном определяются тепловыми нагрузками, действующими на обращённые к плазме поверхности. По результатам работы были даны рекомендации по изменению конструкции для наиболее напряжённых её элементов. Окончательное заключение о прочности центральной сборки дивертора будет дано после внесения запланированных изменений в конструкцию и уточнения исходных данных для расчёта температурных полей.

Ключевые слова: реактор-токамак ИТЭР, центральная сборка дивертора, конечно-элементный расчёт, оценка прочности и ресурса.

STRENGTH ESTIMATION OF THE ITER DIVERTOR DOME. A.B. ALEKSEEV, A.N. LABUSOV, A.N. MAKHANKOV, M.V. KHOKHLOV. Stress analysis and strength estimation of the ITER divertor dome under operating electromagnetic and thermal loads have been performed. Two types of finite element models — global of the whole divertor dome and local models of the most critical dome parts — were involved into structural analysis. Dynamic stress analysis of the divertor dome under electromagnetic loads at plasma disruptions has been used for strength assessment of the main structural elements (supports, tubes, etc). Local models have been used for strength estimation of the plasma facing units under electromagnetic and thermal loads. Performed analysis has shown that strength of the dome main structural elements is determined by electromagnetic loads at plasma disruptions. Damage fracture of the dome plasma facing units corresponds to the thermal loads mainly. Recommendations on the base of the dome structural analysis results have been employed in the design. The conclusion about strength of the ITER divertor dome will be done after all design modifications and more exact definition of operating thermal loads.

Key words: ITER tokamak, divertor dome, finite element analysis, structural analysis, strength estimation.

ВВЕДЕНИЕ

В рамках международного соглашения по ИТЭР Российская Федерация является ответственной за поставку центральных сборок для реактора-токамака. Целью работы является оценка прочности и ресурса центральной сборки дивертора ИТЭР при действии эксплуатационных электромагнитных и температурных нагрузок.

ОПИСАНИЕ КОНСТРУКЦИИ

Кассета дивертора ИТЭР состоит из несущего корпуса и присоединённых к нему навесных компонентов, включающих центральную сборку, внутреннюю и внешнюю вертикальные мишени (рис. 1). Масса кассеты с навесными компонентами равна 12 тонн, общее число кассет дивертора составляет 54. Компоненты дивертора непосредственно обращены к плазме, являются охлаждаемыми, а их поверхность облицована защитными плитками.

Центральная сборка представляет собой стальную конструкцию, состоящую из внутреннего, внешнего и верхнего коллекторов, соединённых

Рис. 1. Кассета дивертора ИТЭР

Рис. 2. Центральная сборка дивертора ИТЭР

Рис. 3. Крепление теплозащитных элементов к коллекторам

шестью трубами (рис. 2). Коллекторы центральной сборки закрыты теплозащитными элементами. Теплозащитные элементы (купол, внутренние и внешние отражающие пластины) снабжены каналами охлаждения в форме гиперовопотрона. Наружная поверхность данных элементов, обращённая к плазме, облицована вольфрамовыми плитками. Теплозащитные элементы прикреплены к коллекторам при помощи двух штифтов (рис. 3, а). Штифтовые отверстия в расположенных на коллекторах опорных проушинах круглые (рис. 3, б). В каждом из теплозащитных элементов есть два ответных отверстия — круглое и овальное (см. рис. 3, а). Один из штифтов, вставленный в круглое отверстие, неподвижен, другой, находящийся в овальном отверстии, имеет возможность перемещаться вдоль него. При действии тепловых нагрузок температура теплозащитных элементов выше, чем температура коллекторов с проушинами, к которым они прикреплены. В этом случае подвижный штифт за счёт перемещения в овальном отверстии позволяет уменьшить температурные напряжения в опорах, вызванные разницей температур коллектора и теплозащитных элементов. Вода для охлаждения этих элементов подаётся из коллекторов посредством стальных трубок.

Материал коллекторов — нержавеющая сталь 316L(N)-IG, силовые трубы и подводящие трубки изготовлены из нержавеющей стали

316L. Материалы теплозащитных элементов — нержавеющая сталь 316L(N)-IG (несущая конструкция), хромоциркониевая бронза CuCrZr (канал охлаждения) и облицовка из вольфрама с подложкой из безкислородной меди. Штифты крепления теплозащитных элементов изготовлены из алюминиевой бронзы марки С63200.

Центральная сборка крепится к корпусу кассеты с помощью четырёх шарнирных опор, изготовленных из стали марок ХМ-19, 660 и алюминиевой бронзы С63200. Две из четырёх опор расположены на внутреннем коллекторе и являются шарнирно-неподвижными. Две оставшиеся опоры, расположенные на внешнем коллекторе, обеспечивают шарнирно-подвижное соединение в плоскости дивертора. Масса центральной сборки составляет одну тонну.

РАСЧЁТНЫЕ НАГРУЗКИ НА ЦЕНТРАЛЬНУЮ СБОРКУ

Расчётными нагрузками, действующими на центральную сборку, являются:

- собственный вес;
- внутреннее давление воды;
- электромагнитные нагрузки (ЭМН), вызванные смещением плазмы. В качестве наиболее консервативных были рассмотрены силы, возникающие при быстром (режимы FDVDE-II и FDVDE-III) движении плазмы по вертикали вниз. Режим FDVDE-II соответствует нормальным условиям эксплуатации (НУЭ) токамака, FDVDE-III — нарушению нормальных условий эксплуатации (ННУЭ);
- нестационарные тепловые нагрузки нормальных условий эксплуатации.

Рис. 4 иллюстрирует временную зависимость интегральных электромагнитных нагрузок на центральную сборку дивертора в режиме FDVDE-III в интервале времени от 640 до 730 мс, соответствующих наибольшим значениям. Нагрузки, соответствующие режимам FDVDE-II и FDVDE-III, были рассчитаны специалистами НИИЭФА (отдел НИВО, НТЦ «Синтез») при помощи электромагнитного кода TYPHOON [1].

Расчётные нестационарные тепловые нагрузки на купол, внутренние и внешние отражающие пластины были заданы при помощи эпюр, характеризующих распределение плотности тепловых потоков по поверхности элементов, обращённой к плазме [2]. Изменение плотности теплового потока во времени представлено на рис. 5, расчётный интервал между импульсами равен 1400 с. Исходные и начальные данные для расчёта полей температур были предоставлены Организацией ИТЭР [2].

Рис. 4. Электромагнитные нагрузки на касету дивертора в режиме FDVDE-III: — суммарная сила, кН; - - - суммарный момент, кН·м

Рис. 5. Изменение во времени плотности теплового потока

ОПИСАНИЕ МОДЕЛЕЙ

Для проведения расчётов напряженно-деформированного состояния (НДС) центральной сборки дивертора были разработаны глобальная пространственная конечно-элементная (КЭ) модель (рис. 6) и локальные модели для наиболее нагруженных элементов: отражающих пластин (внешних и внутренних), купола и шарнирных опор. Рис. 7 иллюстрирует некоторые локальные конечно-элементные модели. Глобальная линейаризованная модель, включающая опоры, силовые трубы, коллекторы и теплозащитные элементы, применялась для оценки прочности силовой структуры центральной сборки. Локальные модели применялись для расчетов НДС при действии ЭМН и температурных полей с учётом контактного взаимодействия, нелинейности материалов и т.п. В расчётах ЭМН были приложены к узлам моделей в виде распределённых по объёму узловых сил (выходной результат ЭМ кода TYPHOON). Расчётные сетки были построены таким образом, чтобы координаты узлов, используемых в расчётах НДС и ЭМН, совпадали. Температурные поля были определены при известных граничных и начальных условиях с использованием КЭ сетки для расчётов НДС. Физико-механические свойства материалов, необходимые для моделирования и выполнения расчётов, были предоставлены Организацией ИТЭР.

Рис. 6. Конечно-элементная модель центральной сборки ИТЭР

Рис. 7. Локальные модели элементов центральной сборки дивертора

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЁТА

Опоры и силовая конструкция центральной сборки. Для оценки прочности опор и силовой конструкции центральной сборки действующими нагрузками были приняты следующие:

- собственный вес и давление воды;
- ЭМН при срывах тока плазмы FDVDE-II и FDVDE-III (см. рис. 4);
- температура конструкции принята равной 150 °С, что соответствует средней температуре в силовой части конструкции. Температура воды равна 130 °С.

Оценка прочности силовой конструкции и опор центральной сборки при действии электромагнитных сил была выполнена на основе результатов расчёта НДС с использованием глобальной модели. Расчёт НДС центральной сборки дивертора с учётом динамического поведения конструкции проведён в упругой постановке методом прямого интегрирования. Относительное демпфирование конструкции в расчёте принято равным 0,02 (данное значение соответствует конструкции со сварными соединениями). Рис. 8 иллюстрирует суммарные перемещения центральной сборки при действии ЭМН, вызванных быстрым смещением плазмы вниз (режим FDVDE-III). На рис. 9 представлено изменение во времени суммарных перемещений для трёх характерных точек конструкции: купола, внешней и внутренней отражающих пластин. Результаты расчётов показали, что шарнирные опоры и силовые трубы являются наиболее нагруженными элементами конструкции (рис. 10). Оценка прочности шарнирных опор, выполненная на основе упругого расчёта, показала, что данные элементы конструкции удовлетворяют критериям прочности ИТЭР в случае действия нагрузок режима НУЭ (FDVDE-II). Для подтверждения прочности силовых труб при действии нагрузок ННУЭ (FDVDE-III) был выполнен расчёт на несущую способность в нелинейной постановке как без учёта упрочнения материала (идеально-пластическое), так и с его учётом (кинематическое упрочнение). Рис. 11 иллюстрирует результаты расчёта с кинематическим упрочнением материала.

Рис. 8. Суммарные перемещения (м) центральной сборки дивертора при действии ЭМН (режим FDVDE-III)

Рис. 10. Интенсивность напряжений (МПа) в силовой конструкции центральной сборки дивертора при действии ЭМН (режим FDVDE-III)

Рис. 9. Изменение во времени суммарных перемещений (мм) купола, внешней и внутренней отражающих пластин центральной сборки дивертора при действии ЭМН (режим FDVDE-III): 1 — купол; 2 — внешняя отражающая пластина; 3 — внутренняя отражающая пластина

Рис. 11. Результаты расчёта силовых труб на несущую способность при действии ЭМН (режим FDVDE-III): □ — нижняя труба

Теплозащитные элементы. Для оценки прочности и ресурса купола, внутренних и внешних отражающих пластин действующими нагрузками были приняты:

- собственный вес и давление воды;
- ЭМН при различных режимах срыва тока плазмы (FDVDE, SDVDE, Disruption, TFCFD и т.д.) [2];
- температурные поля в теплозащитных элементах, соответствующие нормальным условиям эксплуатации. Они были рассчитаны в нестационарной постановке с использованием заданных начальных и граничных условий [2].

Расчёт НДС и выполненная по его результатам оценка статической прочности теплозащитных элементов центральной сборки и их опор показали, что приведённые напряжения, вызванные механическими нагрузками (вес, давление воды и электромагнитные силы), не превосходят допускаемых значений. Анализ ЭМН, действующих на теплозащитные элементы центральной сборки, показал, что наибольшие значения нагрузок соответствуют режиму FDVDE-III.

Для оценки циклической прочности теплозащитных элементов и их опор были проведены расчёты на прогрессирующее формоизменение и малоцикловую усталостную прочность. Оценка накопленного циклического повреждения (отношение рабочего числа циклов к допускаемому при данных нагрузках) теплозащитных элементов от ЭМН показала, что его величина равна 0,02.

Расчёт НДС при действии тепловых нагрузок нормальных условий эксплуатации (рис. 12, 13) и последующая оценка циклической прочности показали, что накопленная циклическая повреждаемость от данных нагрузок составляет величину 0,5 для внутренних и внешних отражающих пластин. Следует отметить, что поверочный расчёт напряженно-деформированного состояния при действии тепловых нагрузок с последующей оценкой прочности и ресурса конструкции будет выполнен после уточнения исходных данных для расчёта полей температур. Результаты оценки прочности элементов центральной сборки приведены в таблице.

Рис. 12. Интенсивность напряжений (МПа) в стальной части купола центральной сборки при действии тепловых нагрузок НУЭ

Рис. 13. Интенсивность напряжений (МПа) в бронзовой части купола центральной сборки при действии тепловых нагрузок НУЭ

ВЫВОДЫ

В результате работы были разработаны глобальная модель центральной сборки дивертора и локальные конечно-элементные модели приёмных элементов и опор. Предварительные результаты показали, что конструкция центральной сборки дивертора удовлетворяет критериям прочности ИТЭР при действии механических нагрузок нормальных условий эксплуатации.

Результаты расчётов на прочность центральной сборки дивертора ИТЭР при действии эксплуатационных электромагнитных и тепловых нагрузок показали следующее:

- прочность и ресурс силовой конструкции и опор в первую очередь определяются механическими нагрузками, вызванными срывами тока плазмы;
- прочность и ресурс теплозащитных элементов центральной сборки в основном определяются тепловыми нагрузками, действующими на обращённые к плазме поверхности.

Результаты оценки прочности центральной сборки дивертора ИТЭР

Элемент сборки	Механические нагрузки		Температурные нагрузки	
	Статический запас прочности	Накопленное повреждение	Статический запас прочности	Накопленное повреждение
Теплозащитные элементы:				
внутренние отражающие пластины	1,80	0,02	2,80	0,50
внешние отражающие пластины	1,90	0,02	2,30	0,38
купол	2,40	0,02	2,00	>1
Опоры теплозащитных элементов:				
штифты	8,70	0,02	>10	0,88
проушины	3,40	0,02	>10	<0,01
Трубки охлаждения теплозащитных элементов:				
внутренних отражающих пластин	6,10	<0,01	6,40	0,16
внешних отражающих пластин	6,10	<0,01	6,40	0,51
купола	4,00	<0,01	6,40	0,27
Силовые трубы	0,83			
Внутренние опоры центральной сборки:				
проушины центральной сборки	1,05			
проушины кассеты	1,92			
ось	1,31			
Внешние опоры центральной сборки:				
проушины центральной сборки	2,33			
проушины кассеты	2,16			
оси	1,92			
Промежуточные звенья	8,47			
Коллекторы охлаждения между центральной сборкой и корпусом кассеты	>10	0,75	>10	<0,01

По результатам выполненных расчётов были внесены изменения в конструкцию центральной сборки с выполнением соответствующих поверочных расчётов. Например, за счёт увеличения податливости охлаждающих трубок внутренних отражающих пластин был обеспечен требуемый ресурс. С целью упрощения изготовления были изменены как форма пазов для опорных проушин в теплозащитных элементах, так и самих проушин.

Окончательное заключение о прочности центральной сборки дивертора ИТЭР будет сделано на основе поверочного расчёта после внесения всех запланированных изменений в конструкцию и уточнения исходных данных для расчёта температурных полей.

REFERENCES

1. **Belov A.V., Doinikov N.I., Duke A.E., Kokotkov V.V., Kotov V.L., Kuchtin V.P., Lamzin E.A., Sytchevski S.E.** Transient electromagnetic analysis in tokamaks using TYPHOON code. — Fusion Engineering and Design, 1996, vol. 31, pp. 167—180.
2. **Initial** data for calculation of temperature fields were provided by the ITER Organization: Divertor stress report. Strategy and content. IDM number: D_2NGFEX v1.9 (in Russian).

AUTHORS

Alekseev A.B. D.V. Efremov Scientific Research Institute of Electrophysical Apparatus (STC «Synthesis»), pos. Metallostroy, Doroga na Metallostroy 3, 196641 St. Petersburg, Russia

Labusov A.N. D.V. Efremov Scientific Research Institute of Electrophysical Apparatus (STC «Synthesis»), pos. Metallostroy, Doroga na Metallostroy 3, 196641 St. Petersburg, Russia; labusov@sintez.niiefa.spb.su

Makhankov A.N. D.V. Efremov Scientific Research Institute of Electrophysical Apparatus (STC «Synthesis»), pos. Metallostroy, Doroga na Metallostroy 3, 196641 St. Petersburg, Russia

Khokhlov M.V. D.V. Efremov Scientific Research Institute of Electrophysical Apparatus (STC «Synthesis»), pos. Metallostroy, Doroga na Metallostroy 3, 196641 St. Petersburg, Russia

Received 3 August 2010

Problems of Atomic Science and Technology
Ser. Thermonuclear Fusion, 2010, issue 4, pp. 7—12.