

Тепловой расчет элементов панели первой стенки

С. Н. Томилов¹, М. Н. Свириденко¹, А. Ю. Лешуков¹, Ю. С. Стребков¹

¹АО «Ордена Ленина Научно-исследовательский и конструкторский институт энерготехники им. Н.А.Доллежала», Р.О.Вох 788, 101000, Москва, Малая Красносельская, 2/8.

В рамках реализации Соглашения о Поставке [1], специалистами НИКИЭТ и НИИЭФА разрабатывается конструкция полномасштабного прототипа панели первой стенки (ППС) для демонстрации возможности ее изготовления и квалификации основных технологических процессов. Конструкция прототипа разработана на основе ППС №14 тип А, затем для отработки основных технологических процессов был изготовлен полупрототип (6 энергонапряженных компонентов, соединенных последовательно гидравлически и приваренных к фрагменту несущей конструкции), а также проведены тепловые испытания. На основе полученного опыта изготовления и испытаний полупрототипа в конструкцию прототипа были внесены изменения, позволяющие упростить процессы изготовления и сборки, а также обеспечить работоспособность в условиях эксплуатации бланкета ИТЭР.

Каждая ППС включает энергонапряженные компоненты (пальцы ПС), несущую конструкцию ПС (НКПС), защитный тепловой экран (ЗТЭ), системы механического крепления и электрической связи (комплект электрических соединителей) «ППС/защитный блок модуля бланкета». Пальцы ПС фиксируются на НКПС с помощью двух силовых сварных швов. Для обеспечения доступа сварочного оборудования в центре ППС выполнен центральный паз шириной 60 мм. Защитный тепловой экран (ЗТЭ) используется в конструкции ППС для защиты центрального паза от излучения плазмы. Крепление ЗТЭ осуществляется с помощью трех кольцевых сварных швов, а гидравлическое соединение с НКПС - с помощью двух трубок. Базовая конструкция ЗТЭ была изменена для упрощения изготовления и сборки.

В данной статье представлены результаты теплового расчета, расчета напряженно-деформированного состояния (НДС) и оценка прочностных критериев для элементов модифицированной ППС, в частности ЗТЭ.

Введение

На внутренней поверхности вакуумной камеры ИТЭР размещены 440 модулей blankets (МБ). Каждый МБ состоит из двух составных частей: защитного блока (ЗБ) и ППС. ППС предназначена для:

- формирования обращенной к плазме поверхности, удовлетворяющей требованиям по качеству плазмы;
- восприятия радиационных и тепловых потоков, приходящих на стенки вакуумной камеры;
- защиты внутрикамерных компонентов от контакта с плазмой и электронами;
- создания заменяемой защиты внутрикамерных компонентов от нейтронных повреждений.

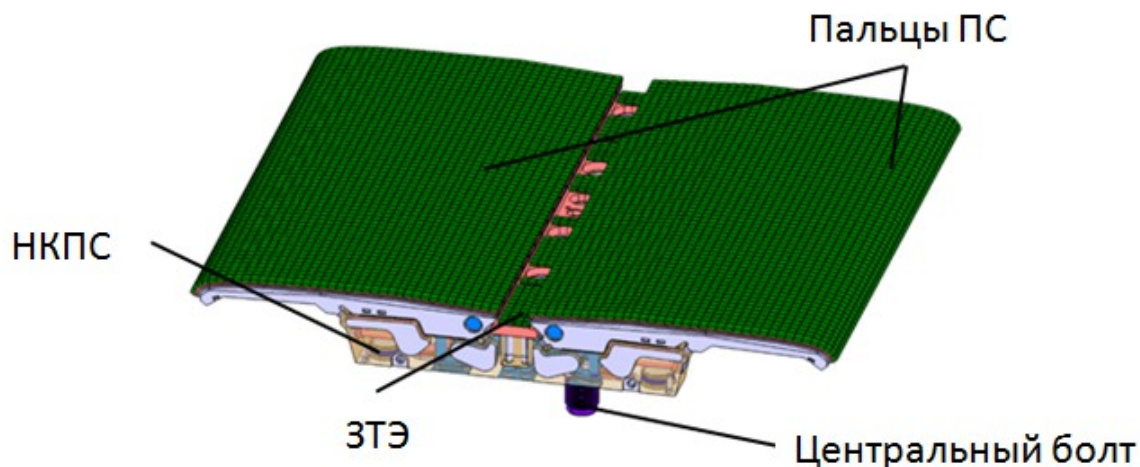


Рисунок 1 – Панель первой стенки

1 Описание конструкции

Каждая ППС включает: НКПС, энергонапряженные компоненты (пальцы ППС), ЗТЭ и системы механического крепления и электрической связи «ППС/ЗБ». Общий вид ППС представлен на рисунке 1. Габаритные размеры панели ПС по радиальной толщине, высоте и ширине: 170 мм, 1010 мм и 1260 мм.

Рассматриваемая конструкция представляет собой полномасштабный прототип ППС, разработанный на основе ППС МБ №14 типа А.

Основной особенностью конструкции является использование двух прямых сварных швов для крепления пальцев ПС на НКПС. Для обеспечения доступа сварочного оборудования в центре ППС выполнен прямоугольный паз. Для защиты центрального паза ППС от теплового излучения используется ЗТЭ, последний вариант конструкции которого представлен на рисунке 2. ЗТЭ представляет собой трехслойную структуру и включает в себя следующие компоненты:

- бериллиевое покрытие толщиной 6 мм;
- бронзовый теплопроводящий слой;
- стальная трубка;
- стальная пластина толщиной 4 мм.

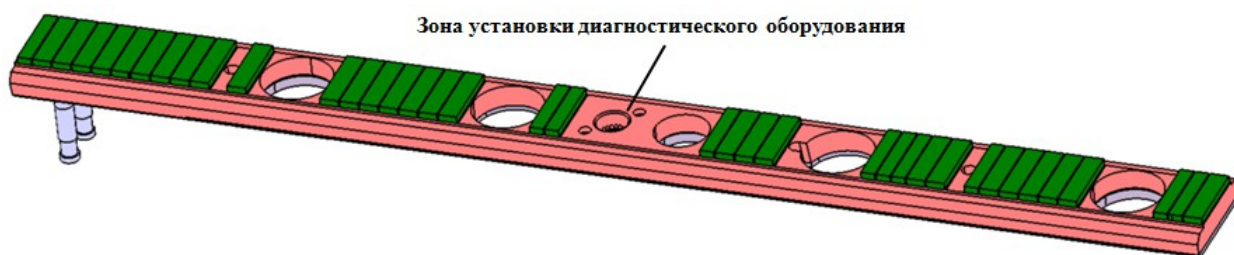


Рисунок 2 – Защитный тепловой экран

Соединение компонентов ЗТЭ выполняется с помощью диффузионной сварки (ГИП). При этом шов, выполненный ГИП не будет являться герметичным, т.к. внутри бронзовой матрицы расположена стальная трубка. ЗТЭ соединяется с НКПС гидравлически с помощью двух трубок и механически с помощью трех сварных швов. Для того, чтобы исключить сварку разнородных материалов, ЗТЭ снабжен нижней стальной пластиной, в которой выполнены проточки под сварные швы крепления с НКПС. Использование CuCrZr-бронзы обусловлено высоким значением теплопроводности (343 Вт/(м*К) при 200° С)), что позволяет эффективно снимать тепловой поток в 0.2-0.35 МВт/м².

2 Результаты теплового расчета в стационарной постановке

Тепловой расчет в стационарной постановке проводится для режима Inductive I.

Расчетная модель представлена на рисунке 3. Для корректного моделирования граничных условий в расчетную модель добавлены фрагменты НКПС.

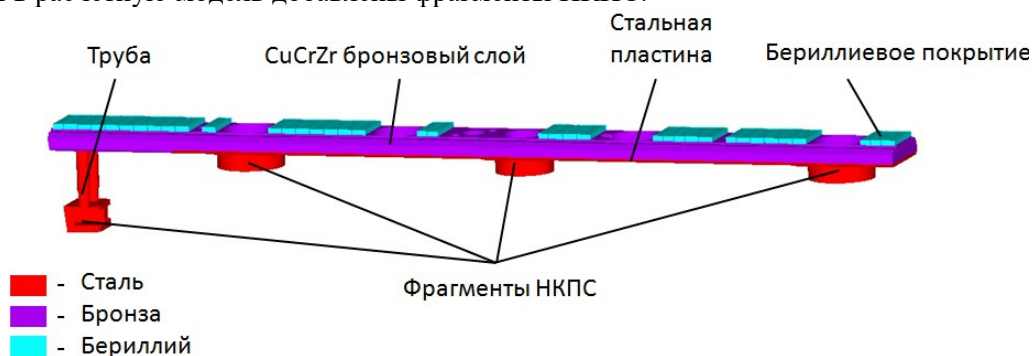


Рисунок 3 – Расчетная модель

Граничные условия для теплового расчета:

- Температура теплоносителя на входе в ЗТЭ - 70°С;
- Расход теплоносителя в ЗТЭ – 0,202 кг/с;
- Тепловой поток, падающий на фронтальную часть ЗТЭ – 0,217 Вт/мм²;
- Тепловой поток, приходящий на ЗТЭ от диагностического оборудования – 0,23 Вт/мм².

Значения энерговыделений в ЗТЭ представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Энерговыделение в ЗТЭ

Элемент ЗТЭ	Энерговыделение, Вт/мм ³
Бериллиевое покрытие	0,00422
Бронзовый слой	0,006812
Стальная пластина	0,006419
Стальная труба	0,006982
Теплоноситель	0,00532

Полученное распределение температур в ЗТЭ в фазе “горение” режима Inductive I представлено на рисунке 4. Максимальная температура (207° С) достигается в бериллиевом покрытии.

Рисунок 4 – Распределение температуры в ЗТЭ в “горении”, °С

Максимальная температура в стальной трубке ЗТЭ достигается в районе поворота тракта (рисунок 5) и составляет 188 °С.

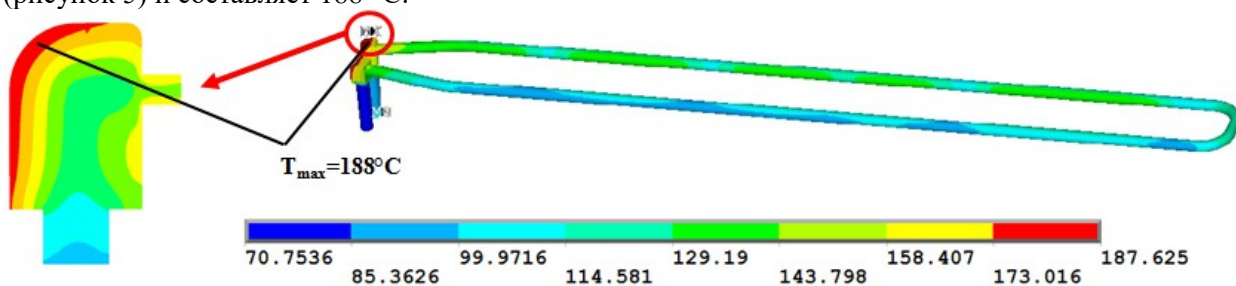


Рисунок 5 – Распределение температуры в трубке ЗТЭ в “горении”, °С

Подогрев теплоносителя в тракте ЗТЭ составил 27,6 °С. На рисунках ба и бб представлено распределение температуры в ядре потока теплоносителя и на смачиваемой поверхности.

а

б

Рисунок 6 – Распределение температуры в теплоносителе в горении, °С

Результаты теплового расчета представлены в таблице 2. Температуры не превышают допусаемых значений.

Таблица 2 – Результаты теплового расчета ЗТЭ.

Компонент	Максимальная температура, °С	Допускаемое значение, °С
Бериллиевое покрытие	207	600
Бронзовый слой	199	350
Трубка	188	450
Стальная пластина	180	450
Смачиваемая поверхность	125	-
Теплоноситель на выходе из ЗТЭ	98	-

3 Результаты расчета НДС и оценка критериев прочности

В качестве граничных условий для прочностного расчета ЗТЭ используется распределение температуры в конструкции, полученное на предыдущем этапе. Расчетная модель с обозначенными местами закрепления представлена на рисунке 7.

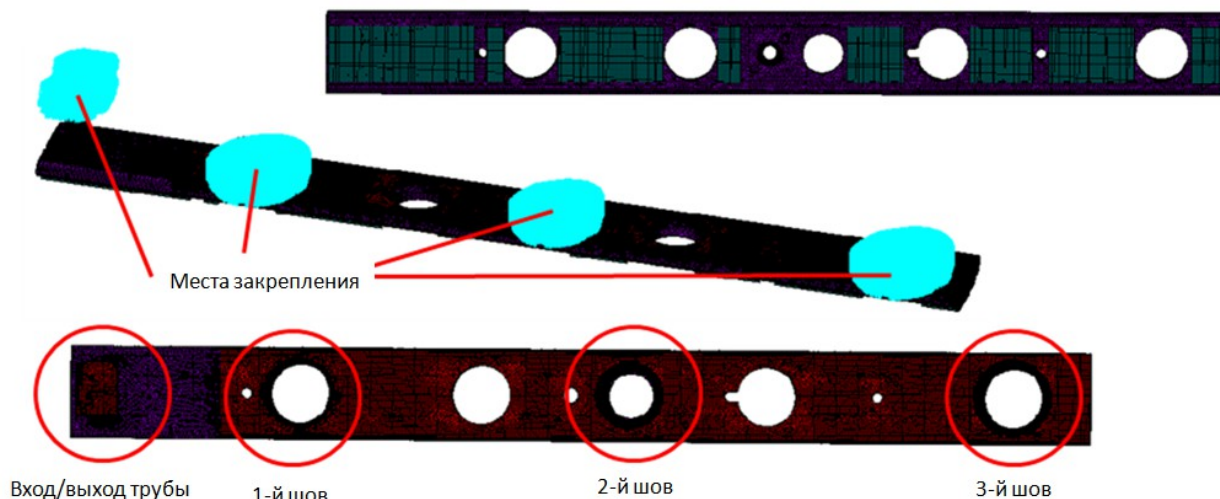


Рисунок 7 – Модель для прочностного расчета

Граничные условия для расчета НДС:

- 1) Давление теплоносителя – 5 МПа;
- 2) Коэффициент трения в месте контакта ЗТЭ с НКПС – 0,4;
- 3) Перемещения в узлах приняты согласно результатам расчета НДС, приведенного в материале [2];

При расчете рассматривались следующие сценарии нагружения:

- 1) “Hydrostatic test”: равномерный прогрев ЗТЭ до температуры 20 °С и давление теплоносителя 7,15 МПа;
- 2) “Preload”: равномерный нагрев ЗТЭ до температуры 20 °С;
- 3) “Прогрев”: равномерный нагрев ЗТЭ до температуры 70 °С;
- 4) “Горение”: распределение температуры в ЗТЭ в “Горении” (см. раздел 2) плюс граничные условия для расчета НДС;
- 5) “Пауза”: распределение температуры в ЗТЭ в “Паузе” плюс граничные условия для расчета НДС.

3.1 Результаты расчета сценария “Hydrostatic test”

Гидроиспытания проводятся при комнатной температуре с давлением теплоносителя, рассчитанным согласно [3].

Распределение эквивалентных напряжений в трубе ЗТЭ показано на рисунке 8. Для определения мембранной и изгибной составляющих полного напряжения выполнена линейаризация напряжения (путь линейаризации показан на рисунке 8). Результаты линейаризации эквивалентных напряжений в трубе ЗТЭ показаны на рисунке 9. Максимальное значение напряжений достигается в начальном и конечном участках трубки и составляет 42 МПа.

Рисунок 8 – Распределение эквивалентных напряжений в трубке ЗТЭ при гидроиспытаниях, МПа

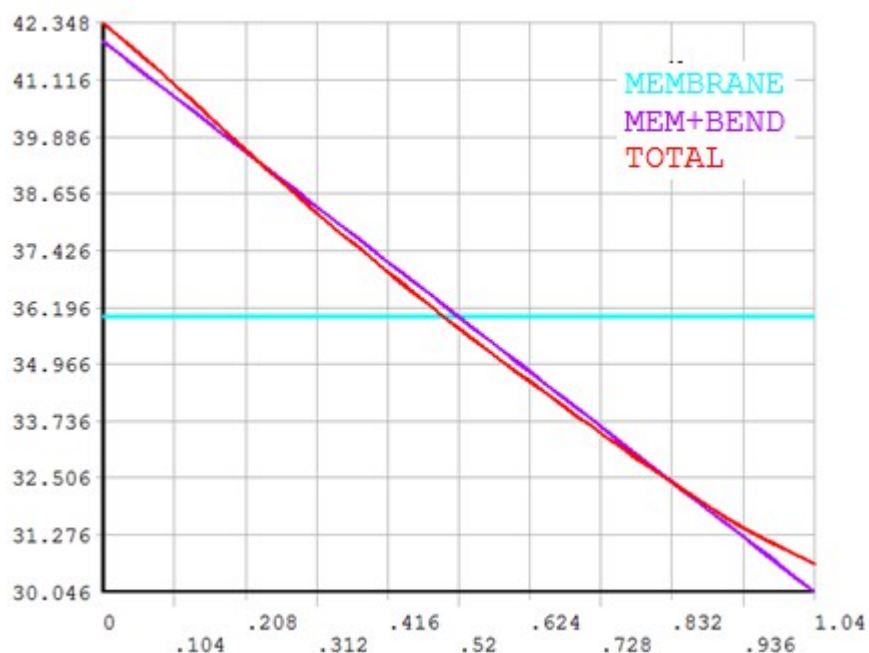


Рисунок 9 – Линейаризация эквивалентных напряжений по толщине трубы

В соответствии с [3]:

$$S_y = 220 \text{ МПа для стали 316 L(n)-IG при температуре } T = 20^\circ\text{C};$$

$$0,67S_y = 147,4 \text{ МПа} < P_m = 35,99 \text{ МПа} < 0,95S_y = 209,0 \text{ МПа};$$

$$(P_m + P_b) = 41,94 \text{ МПа} > 2,43 * S_y - 1,5 P_m = 480,615 \text{ МПа}.$$

Таким образом для трубы ЗТЭ критерии прочности при гидроиспытаниях выполняются.

3.2 Результаты расчета сценария “Горение”

Распределение эквивалентных напряжений в ЗТЭ во время “Горения” представлено на рисунке 10.

Рисунок 10 – Распределение эквивалентных напряжений в ЗТЭ, МПа

Максимальное значение напряжений достигается в области изгиба трубки ЗТЭ и составляет 516 МПа. На рисунке 11 представлено распределение напряжений в трубке ЗТЭ.

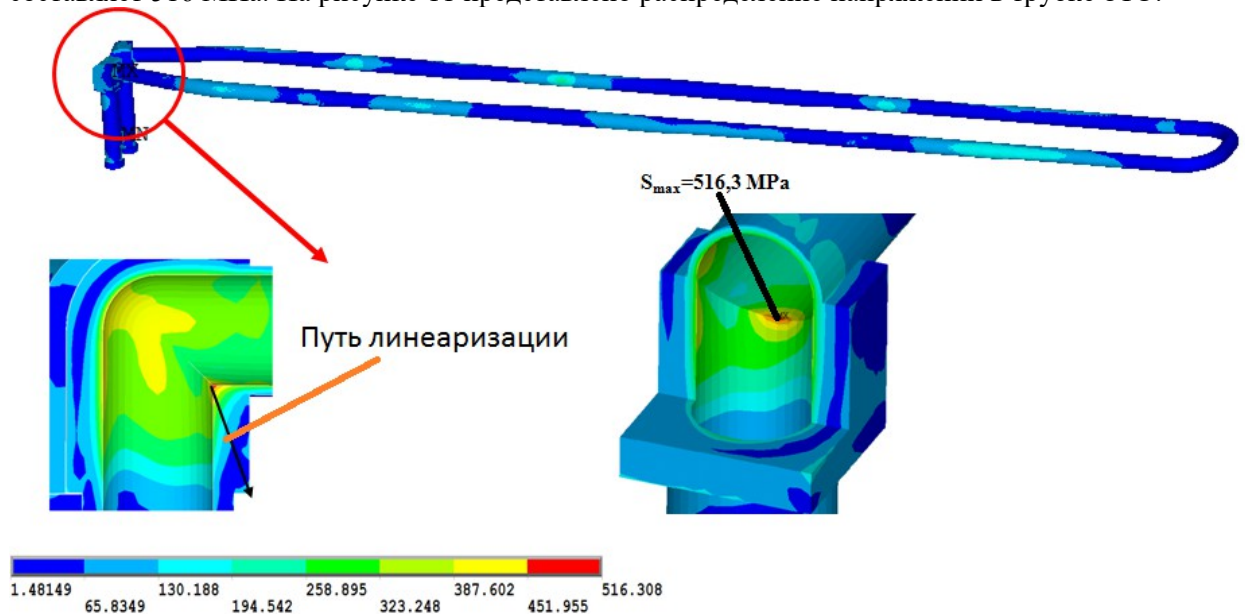


Рисунок 11 – Распределение эквивалентных напряжений в трубке ЗТЭ, МПа

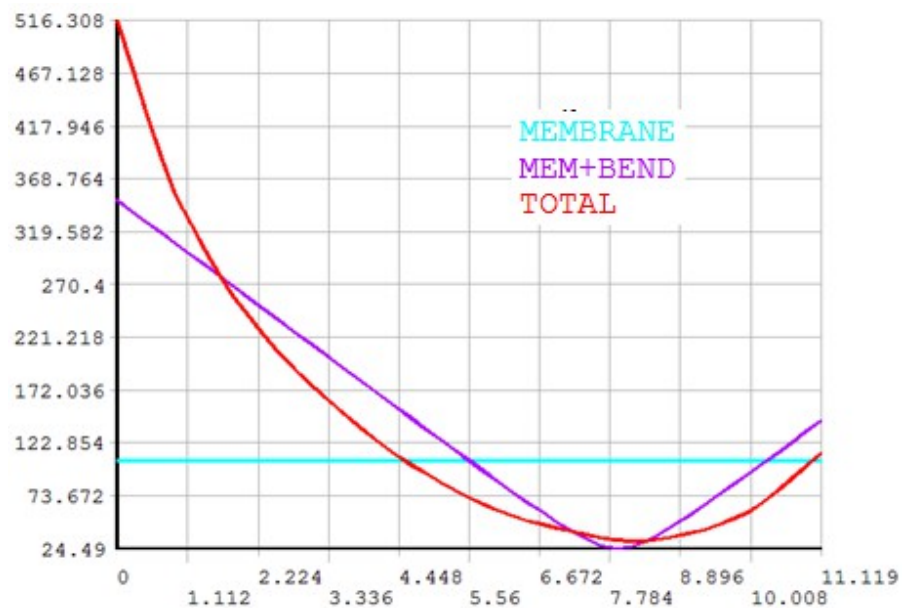


Рисунок 12 – Линейаризация эквивалентных напряжений по направлению, представленному на рисунке 11

Проверка критериев “ratcheting” (прогрессирующее формоизменение), S_d и S_c , согласно, [3]:

$S_m = 139,63 \text{ МПа}$ для стали для стали 316 L(n)-IG при температуре $T = 188^\circ\text{C}$;

$P_m + P_b + Q = 348,9 \text{ МПа} < 3 * S_m = 418,9 \text{ МПа}$ при температуре $T = 188^\circ\text{C}$.

Для температуры 200°C принято значение радиационных повреждений 2 сна. Значение γ_1 принято равным 4, а α_1 равно 0,5.

$P_t + P_b = 106,4 \text{ МПа} < S_e = 581,6 \text{ МПа}$ при температуре $T = 188^\circ\text{C}$, **таким образом**

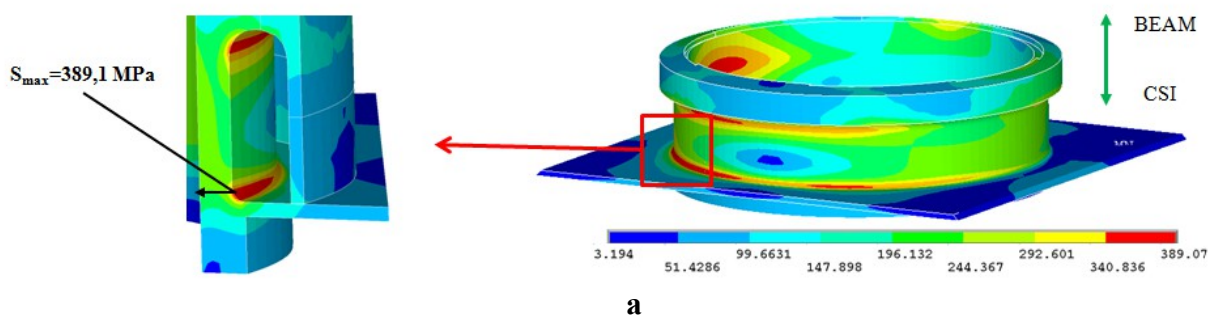
критерий S_e выполняется

$P_t + P_b + Q + F = 516,3 \text{ МПа} < S_d = 28.43 \text{ ГПа}$ при температуре $T = 188^\circ\text{C}$, **таким образом**

критерий S_d выполняется

Помимо оценки прочности конструкции в зоне с максимальным значением эквивалентных напряжений, была проведена оценка работоспособности сварных швов.

Распределение эквивалентных напряжений в 1-м сварном шве (рисунок 7) в “горении” и “паузе” представлено на рисунке 13.



б

а – “горение”; б – “пауза”

Рисунок 13 – Распределение эквивалентных напряжений в 1-м сварном шве, МПа

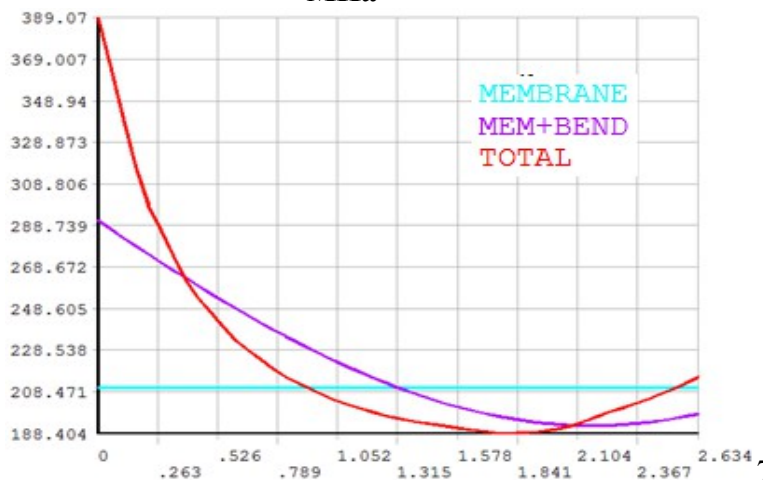


Рисунок 14 – Линеаризация эквивалентных напряжений по толщине сварного шва №1 (рисунок 7)

Проверка критериев “ratcheting” (прогрессирующее формоизменение), S_d и S_e , согласно, [3]:

$$S_m = 141,57 \text{ МПа для стали 316 L(n)-IG при температуре } T= 180^\circ\text{C};$$

$$P_m+P_b+Q = 291,2 \text{ МПа} < 3*S_m = 424,7 \text{ МПа при температуре } T= 180^\circ\text{C}.$$

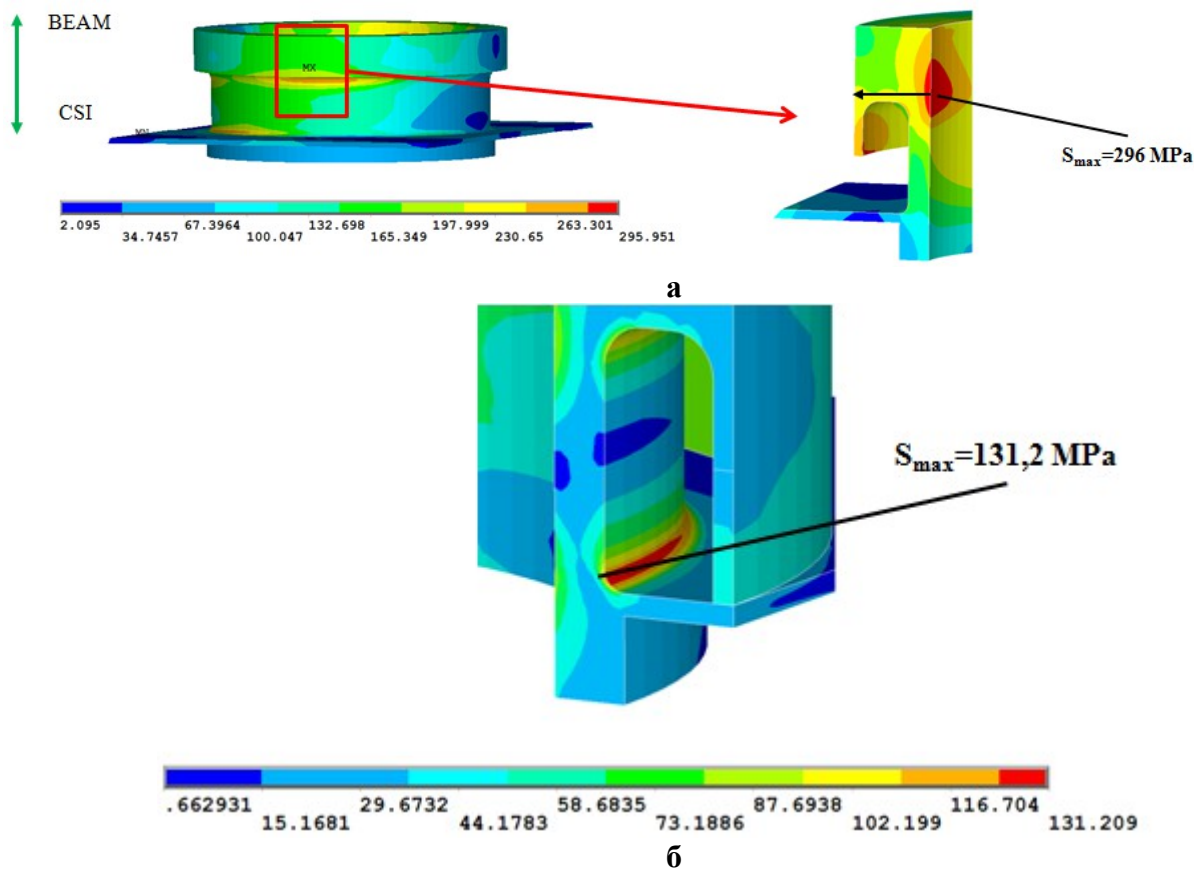
$$P_t+P_b = 210,5 \text{ МПа} < S_e = 631,1 \text{ МПа при температуре } T= 180^\circ\text{C}, \text{ таким образом}$$

критерий S_e выполняется

$$P_t+P_b+Q+F = 291,2 \text{ МПа} < S_d = 32,08 \text{ ГПа при температуре } T= 180^\circ\text{C}, \text{ таким образом}$$

критерий S_d выполняется

Распределение эквивалентных напряжений во 2-м сварном шве (рисунок 7) в “горении” и “паузе” представлено на рисунке 15.



а – “горение”; б – “пауза”

Рисунок 15 – Распределение эквивалентных напряжений во 2-м сварном шве, МПа

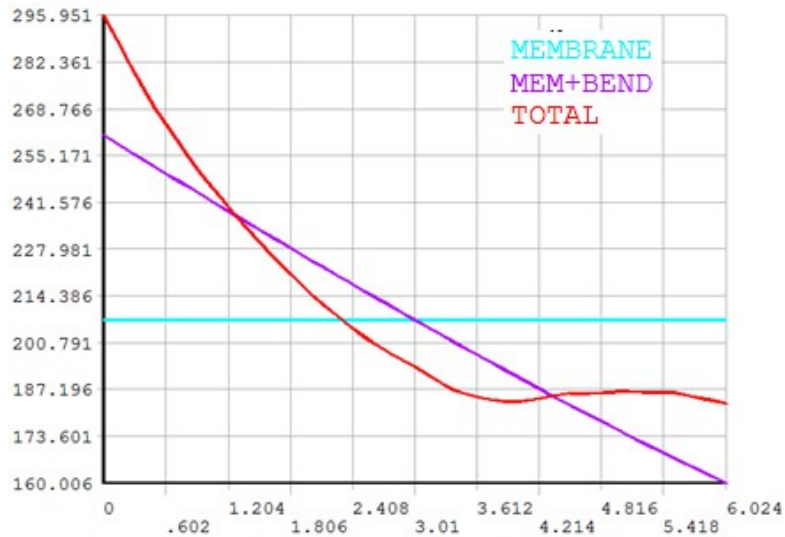


Рисунок 16 – Линеаризация эквивалентных напряжений по толщине сварного шва №2 (рисунок 7)

Проверка критериев “ratcheting” (прогрессирующее формоизменение), S_d и S_e , согласно, [3]:

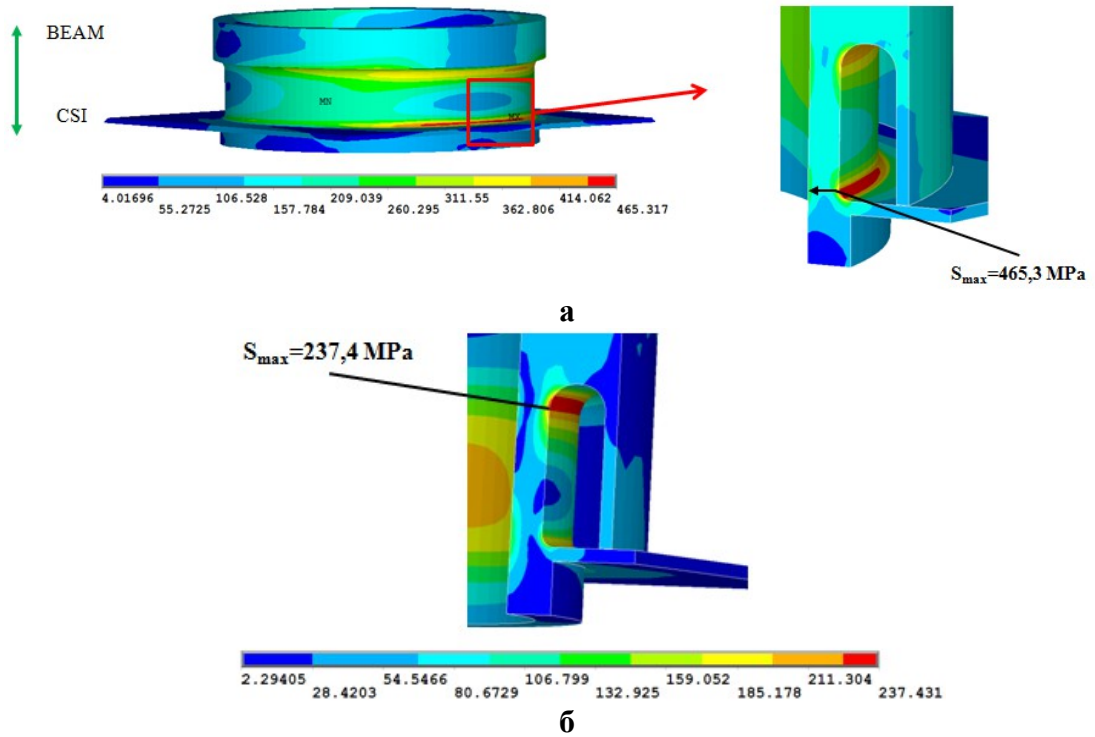
$$S_m = 141,57 \text{ МПа для стали 316 L(n)-IG при температуре } T = 180^\circ\text{C};$$

$$P_m + P_b + Q = 261 \text{ МПа} < 3 * S_m = 424,7 \text{ МПа при температуре } T = 180^\circ\text{C}.$$

$$P_t + P_b = 207,4 \text{ МПа} < S_e = 631,1 \text{ МПа при температуре } T = 180^\circ\text{C}, \text{ таким образом критерий } S_e \text{ выполняется}$$

$$P_t + P_b + Q + F = 296 \text{ МПа} < S_d = 71,6 \text{ ГПа при температуре } T = 180^\circ\text{C}, \text{ таким образом критерий } S_d \text{ выполняется}$$

Распределение эквивалентных напряжений в 3-м сварном шве (рисунок 7) в “горении” и “паузе” представлено на рисунке 17.



а – “горение”; б – “пауза”

Рисунок 17 – Распределение эквивалентных напряжений в 3-м сварном шве, МПа

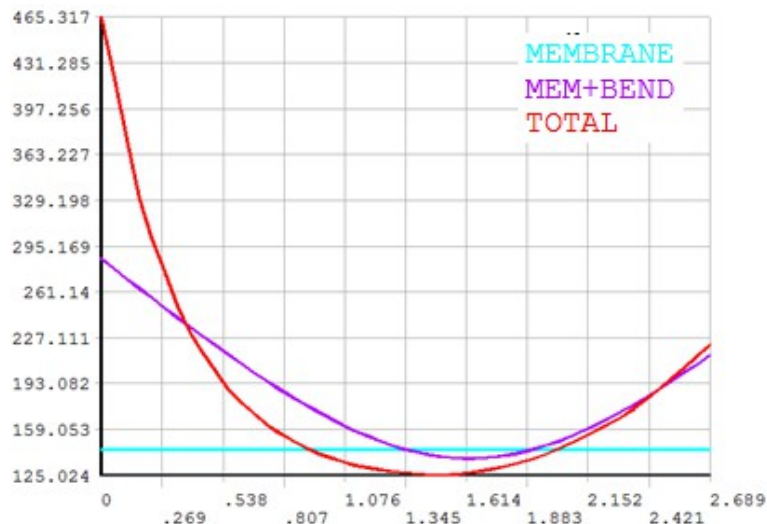


Рисунок 18 – Линейризация эквивалентных напряжений по толщине сварного шва №3 (рисунок 7)

Проверка критериев “ratcheting” (прогрессирующее формоизменение), S_d и S_e , согласно, [3]:

$$S_m = 144,63 \text{ МПа для стали 316 L(n)-IG при температуре } T = 168^\circ\text{C};$$

$$P_m + P_b + Q = 286,2 \text{ МПа} < 3 * S_m = 433,9 \text{ МПа при температуре } T = 168^\circ\text{C}.$$

$$P_l + P_b = 144,1 \text{ МПа} < S_e = 688,9 \text{ МПа при температуре } T = 168^\circ\text{C}, \text{ таким образом критерий } S_e \text{ выполняется}$$

$$P_l + P_b + Q + F = 465,3 \text{ МПа} < S_d = 19,41 \text{ ГПа при температуре } T = 168^\circ\text{C}, \text{ таким образом критерий } S_d \text{ выполняется}$$

Результаты оценки усталостной прочности конструкции представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Результаты оценки усталостной прочности конструкции

Компонент	Максимальное значение напряжения в рассматриваемом месте в “горении”, МПа	Максимальное значение напряжения в рассматриваемом месте в “паузе”, МПа	Эквивалентный размах полной деформации, %	Расчетное количество циклов нагружения	Допускаемое количество циклов
Труба ЗТЭ	516,3	49,6	0,297	Более 10^6	15000
1-й сварной шов	389,1	191,9	0,102	Более 10^6	15000
2-й сварной шов	296	108,9	0,097	Более 10^6	15000
3-й сварной шов	465,3	184,3	0,16	Более 10^6	15000

Расчетное количество циклов нагружения превышает допускаемое количество, таким образом критерий усталостной прочности выполняется.

Заключение

- 1) Разработана конструкция ЗТЭ для защиты технологического паза на ППС от радиационного излучения.
- 2) Проведен тепловой расчет конструкции ЗТЭ в режиме Inductive I в стационарной постановке. Максимальное значение температуры в ЗТЭ достигается на стадии “горение” в бериллиевом покрытии и составляет 207°С.
- 3) Трубка ЗТЭ удовлетворяет требованиям критериев прочности, используемых для гидроиспытаний.
- 4) Проведен расчет НДС для 5 сценариев нагружения. Максимальное значение эквивалентного напряжения достигается в области изгиба трубы ЗТЭ и составляет 516,3 МПа для сценария нагружения “горение”, при этом максимальное эквивалентное напряжение в сварных соединениях ЗТЭ достигается в 3-м сварном шве и составляет 465,3 МПа.
- 5) Все рассмотренные критерии статической и усталостной прочности в критических точках выполняются.

Литература:

1. Leshukov A. «Overview of JSC “NIKIET” activity on ITER Procurement Arrangements», FED (ISFNT 12) in press.
2. M. N. Sviridenko «Analysys results of the EHF FW Panel with welded fingers», Fusion Engineering and Design 89 (2014) 948 – 937.
3. IO ITER " ITER Structural Design Criteria for In-vessel components (SDC-IC)", G 74 MA 8 01-65-28 W0.2, ITER_D_222RHC, 2012.