

УДК 621.039.623:634:539.4.001.2:661.666

## МОДЕЛЬ ПЕРВОЙ СТЕНКИ ДЛЯ РЕКОНСТРУИРУЕМОГО ТОКАМАКА Т-15 С ГРАФИТОВЫМИ ПЛИТКАМИ. ДАННЫЕ ТЕРМОПРОЧНОСТНОГО РАСЧЁТА

*А.В. Клищенко (ИЯС РНЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия)*

Предложена конструкция первой стенки для реконструируемого токамака Т-15. Проведена серия термомеханических расчётов для двух вариантов охлаждения графитовых плиток. Сопоставление результатов расчётов выявляет предпочтительный вариант охлаждения графитовых плиток путём теплового переизлучения на поверхность охлаждаемой водой стенки.

**Ключевые слова:** токамак Т-15, первая стенка, графитовая плитка, термомеханический расчёт.

THE FIRST WALL MODEL WITH GRAPHITE TILES FOR T-15. THERMAL STRESS ANALYSIS. A.V. KLISHCHENKO. The first wall model with graphite tiles for the reconstructed tokamak-15 was presented. Thermal stress analysis for two variants of the graphite tile cooling was performed. The results of the thermal stress analysis have shown that the graphite tiles cooling by heat radiation onto the first wall surface cooled by water is preferable.

**Key words:** tokamak-15, first wall, graphite tile, thermal stress analysis.

### ВВЕДЕНИЕ

Предполагаемые реконструкция и модернизация токамака Т-15 направлены на расширение области его рабочих режимов в сторону реакторных параметров плазмы. Работа токамака Т-15 в условиях длительного плазменного разряда предъявляет соответствующие требования к системе отвода энергии, включая первую стенку. Конструкция первой стенки реконструируемого токамака Т-15 в условиях расчётных тепловых потоков до  $q = 0,5$  МВт/м<sup>2</sup> должна обладать надёжностью, возможностью замены графитовых плиток без демонтажа всей панели стенки и оптимальной себестоимостью.

### КОНСТРУКЦИЯ ПАНЕЛИ ПЕРВОЙ СТЕНКИ

В данной работе предложен вариант стальной конструкции первой стенки с графитовыми плитками из мелкозернистого графита МПГ-8. Моделирование и расчёты проводились при помощи конечно-элементной программы ANSYS. Трёхмерное изображение симметричной четверти графитовой плитки, фрагмента панели первой стенки, болта и пружины показано на рис. 1, где стальные элементы конструкции и пружина показаны одним цветом. Графитовые плитки размером 10×10×3 см прикрепляются к поверхности стенки стальным болтом диаметром 6 мм с поджимающей плитку к поверхности стальной стенки пружиной.

Пружина верхней частью опирается в шляпку болта диаметром 12 мм, нижней — в нижнюю шайбу цилиндра (рис. 2). Верхняя шайба цилиндра опирается на кольцевую выемку графитовой плитки диаметром 30 мм (рис. 3).

Диаметр графитовой заглушки также 30 мм, толщина 10 мм. Заглушка ввинчивается в плитку через резьбовое соединение. Таким образом, плитки прикрепляются к панели первой стенки болтом и прижимаются к поверхности стенки пружиной, без фиксации плитки болтом. Гайкой является стальная трубка длиной 20 мм (толщина стальной стенки) с внутренней резьбой и внешним диаметром 9 мм (см. рис. 1). Первая стенка толщиной 20 мм состоит из двух стальных пластин толщиной 2 мм, соединённых между собой этими трубками и боковыми пластинами. В данном случае размер панели 400×400×20 мм. Водяное охлаждение панели первой стенки может осуществляться посредством внутренней змеевидной трубки или путём циркуляции воды внутри панели первой стенки. В последнем случае охлаждаются все конструктивные элементы панели, поскольку вода проникает во все внутренние полости её конструкции и осуществляется



Рис. 1. Симметричная четверть графитовой плитки, фрагмента панели первой стенки

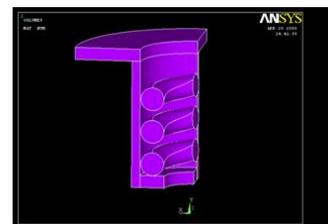


Рис. 2. Симметричная четверть конструкции прижимного цилиндра с шайбами и пружиной

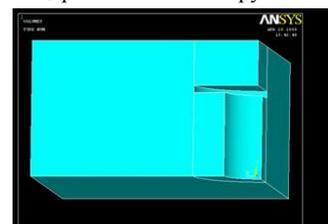


Рис. 3. Симметричная четверть конструкции графитовой плитки с заглушкой

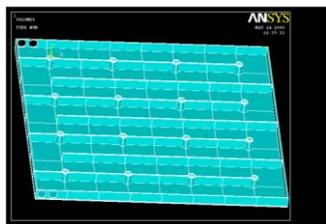


Рис. 4. Панель первой стенки со снятой верхней пластиной для демонстрации внутренней конструкции панели и системы охлаждения

наиболее эффективный теплоём от воспринимающей тепловой поток графитовой плитки. В данной работе рассматривается конструкция панели первой стенки, охлаждаемой циркулирующей внутри неё водой, без использования охлаждающих трубок (рис. 4).

## РАСЧЕТНАЯ МОДЕЛЬ

Исходные данные нагружающего теплового потока на поверхность плитки: импульсная номинальная тепловая нагрузка  $q = 0,1 \text{ МВт/м}^2$  длительностью 30 с, а также импульсная пиковая нагрузка  $q = 0,5 \text{ МВт/м}^2$  длительностью 30 с, вероятно, возникающая на различных участках первой стенки. Длительность паузы 1170 с при  $q = 0$ .

Термопрочностные свойства графита МПГ-8 [1, 2], применённые в расчётах, в системе СИ в зависимости от температуры приведены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1. Термопрочностные свойства графита МПГ-8

$T, ^\circ\text{C}$	$E \cdot 10^{-3}, \text{ МПа}$	$\alpha \cdot 10^5, 1/^\circ\text{C}$	$\rho, \text{ кг/м}^3$	$K, \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$	$C, \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$	$\nu$
0	10	0,63	1800	115	600	0,25
300				104	678	
500				88	937	
800				62	1534	
1000	11	0,76	1800	38	2010	0,25
1500						

Термопрочностные свойства стали 316, применённые в расчётах, в системе СИ в зависимости от температуры приведены в табл. 2.

Т а б л и ц а 2. Термопрочностные свойства стали 316

$T, ^\circ\text{C}$	$E \cdot 10^6, \text{ МПа}$	$\alpha \cdot 10^4, 1/^\circ\text{C}$	$\rho, \text{ кг/м}^3$	$K, \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$	$C, \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$	$\nu$
10	0,192	0,162	8000	13	450	0,291
149	0,19	0,175	7970	15,8	510	0,303
316	0,174	0,18	7910	18,9	548	317
510	0,158	0,2	7820	21	573	330
1000			7560	27		

Примечание:  $T$  — температура,  $^\circ\text{C}$ ;  $E$  — модуль Юнга, МПа;  $\alpha$  — коэффициент температурного линейного расширения,  $1/^\circ\text{C}$ ;  $\rho$  — плотность,  $\text{кг/м}^3$ ;  $K$  — коэффициент теплопроводности,  $\text{Вт/(м}\cdot\text{К)}$ ;  $C$  — удельная теплоёмкость,  $\text{Дж/(кг}\cdot\text{К)}$ ;  $\nu$  — коэффициент Пуассона. Термопрочностные свойства графита на данном этапе расчётов принимались как изотропные.

Базовая температура в расчётах принималась равной  $\sim 20 \text{ }^\circ\text{C}$ . Температура теплоносителя  $\sim 30 \text{ }^\circ\text{C}$ . Исходная температура конструкции принималась равной  $\sim 30 \text{ }^\circ\text{C}$ . Рассматривались два варианта контакта графитовой плитки с первой стенкой. В первом варианте рассматривался теплопроводящий слой, обеспечивающий полный тепловой контакт путём теплопроводности между плиткой и стенкой. Во втором варианте рассматривалось отсутствие теплового контакта поверхности стенки и плитки путём теплопроводности, а передача тепла от плитки к стенке происходила только тепловым переизлучением. При этом предполагается идеальный тепловой контакт в резьбовом соединении графитовых заглушки и плитки. Расчётной моделью конструкции первой стенки с присоединённой плиткой рассматривалась симметричная четверть по размеру плитки. Расчётная конечно-элементная модель показана на рис. 5.

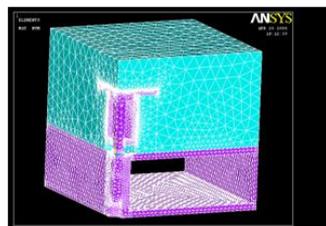


Рис. 5. Конечно-элементная модель

Граничные условия для прочностного расчёта определялись возможностью свободного термического расширения и изгиба всей конструкции панели первой стенки, что обусловлено способом её крепления к вакуумной камере. Давлением теплоносителя в прочностных расчётах пренебрегалось. Также пренебрегалось силой прижима плитки к поверхности стенки пружиной. Проводился упругий термопрочностной расчёт.

### ТЕРМОПРОЧНОСТНОЙ РАСЧЁТ ДЛЯ ВАРИАНТА 1 С ПРОМЕЖУТОЧНЫМ ТЕПЛОПРОВОДЯЩИМ СЛОЕМ

На рис. 6 представлены поля температур модели в конце нагрева длительностью 30 с при номинальной тепловой нагрузке  $q = 0,1 \text{ МВт/м}^2$ .

На рис. 7 представлены поля температур модели в конце нагрева длительностью 30 с при возможной пиковой нагрузке  $q = 0,5 \text{ МВт/м}^2$ .

Прочностной расчёт для модели проводился для конца импульса длительностью 30 с.

Напряжения Мизеса в конце импульса при номинальной тепловой нагрузке  $q = 0,1 \text{ МВт/м}^2$  показаны для плитки на рис. 8 и для стальной стенки на рис. 9.

На рис. 8 видно, что максимальные напряжения Мизеса в графитовой плитке концентрируются в центральной части и являются незначительными по величине (1,8 МПа) при пределе прочности графита МПГ-8, равном 17 МПа. Максимальные напряжения Мизеса в стальной стенке (см. рис. 9) составляют 84 МПа при пределе прочности стали 316 500 МПа и пределе текучести 200 МПа.

Напряжения Мизеса в конце импульса при возможной пиковой нагрузке  $q = 0,5 \text{ МВт/м}^2$  показаны для плитки на рис. 10 и для стальной стенки на рис. 11.

На рис. 10 видно, что максимальные напряжения Мизеса в графитовой плитке концентрируются в центральной части и по величине составляют 10,5 МПа при пределе прочности графита МПГ-8, равном 17 МПа. Максимальные напряжения Мизеса в стальной стенке (см. рис. 11) составляют 410 МПа для упругого расчёта при пределе прочности стали 316 500 МПа и пределе текучести 200 МПа. Таким образом, на участке максимальных напряжений стальной стенки деформация будет упругопластической.

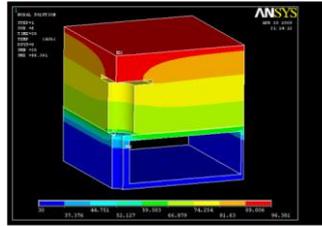


Рис. 6. Поля температур модели (вариант 1) при тепловой нагрузке  $q = 0,1 \text{ МВт/м}^2$

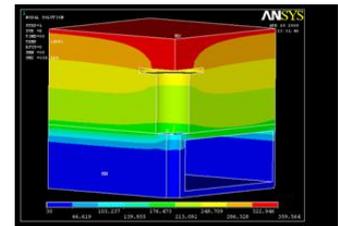


Рис. 7. Поля температур модели (вариант 1) при пиковой тепловой нагрузке  $q = 0,5 \text{ МВт/м}^2$

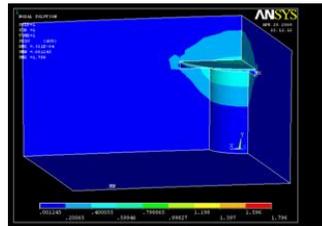


Рис. 8. Напряжения Мизеса (МПа) в плитке (вариант 1) при тепловой нагрузке  $q = 0,1 \text{ МВт/м}^2$

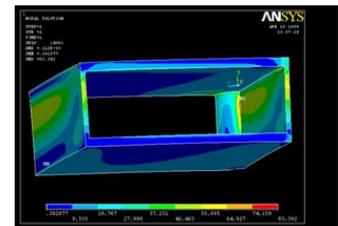


Рис. 9. Напряжения Мизеса (МПа) в стальной стенке (вариант 1) при тепловой нагрузке  $q = 0,1 \text{ МВт/м}^2$

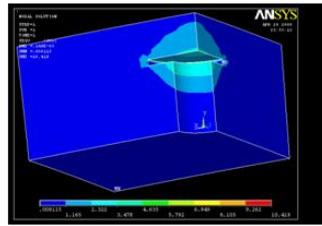


Рис. 10. Напряжения Мизеса (МПа) в плитке (вариант 1) при пиковой тепловой нагрузке  $q = 0,5 \text{ МВт/м}^2$

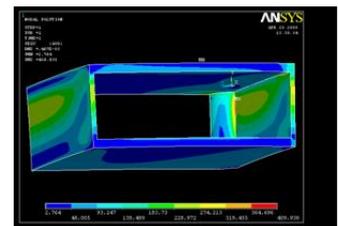


Рис. 11. Напряжения Мизеса (МПа) в стальной стенке (вариант 1) при пиковой тепловой нагрузке  $q = 0,5 \text{ МВт/м}^2$

### ТЕРМОПРОЧНОСТНОЙ РАСЧЁТ ДЛЯ ВАРИАНТА 2 БЕЗ ПРОМЕЖУТОЧНОГО ТЕПЛОПРОВОДЯЩЕГО СЛОЯ. ОХЛАЖДЕНИЕ ГРАФИТОВОЙ ПЛИТКИ ТОЛЬКО ПУТЁМ ТЕПЛОВОГО ПЕРЕИЗЛУЧЕНИЯ НА ПОВЕРХНОСТЬ СТАЛЬНОЙ СТЕНКИ

На рис. 12 представлены поля температур модели в конце цикла нагрева 30 с при номинальной тепловой нагрузке  $q = 0,1 \text{ МВт/м}^2$ , на рис. 13, а, б — в конце паузы длительностью 1170 с при достижении стационарного температурного режима от цикла к циклу.

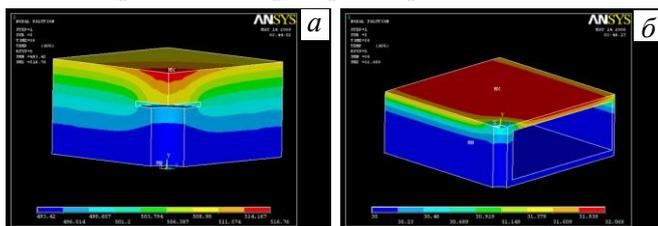


Рис. 12. Поля температур модели (вариант 2) при тепловой нагрузке  $q = 0,1 \text{ МВт/м}^2$  при достижении стационарного температурного режима

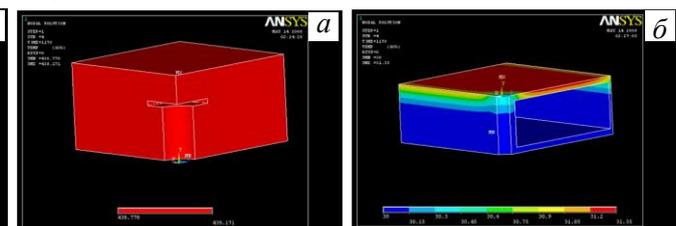


Рис. 13. Поля температур модели (вариант 2) в конце паузы 1170 с при тепловой нагрузке  $q = 0,1 \text{ МВт/м}^2$  во время импульса после достижения стационарного температурного режима

Максимальная температура в плитке 516 °С. На рис. 12, б видно, что максимальный перепад температур в стальной стенке в случае передачи тепла от плитки только путём переизлучения составляет всего 2 °С, что определяется суммарной теплоёмкостью плитки и длительностью паузы.

Прочностной расчёт для модели проводился для конца импульса 30 с. Напряжения Мизеса в плитке в конце импульса при номинальной тепловой нагрузке  $q = 0,1$  МВт/м<sup>2</sup> показаны на рис. 14.

На рис. 15 представлены поля температур модели в конце цикла нагрева длительностью 30 с при возможной пиковой тепловой нагрузке  $q = 0,5$  МВт/м<sup>2</sup> после достижения стационарного температурного режима при номинальной тепловой нагрузке  $q = 0,1$  МВт/м<sup>2</sup> от цикла к циклу.

Максимальная температура в плитке 796 °С. На рис. 15, б видно, что максимальный перепад температур в стальной стенке в случае передачи тепла от плитки только путем переизлучения составляет 6 °С.

Напряжения Мизеса в плитке в конце импульса при возможной пиковой нагрузке  $q = 0,5$  МВт/м<sup>2</sup> показаны на рис. 16.

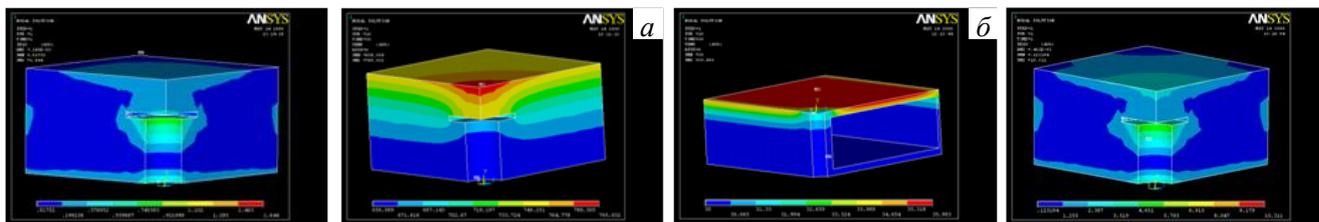


Рис. 14. Напряжения Мизеса (МПа) в плитке (вариант 2) при тепловой нагрузке  $q = 0,1$  МВт/м<sup>2</sup> в конце импульса  
Рис. 15. Поля температур модели (вариант 2) в конце импульса при пиковой тепловой нагрузке  $q = 0,5$  МВт/м<sup>2</sup> и в конце достижения стационарного температурного режима при тепловой нагрузке  $q = 0,1$  МВт/м<sup>2</sup>  
Рис. 16. Напряжения Мизеса (МПа) в плитке (вариант 2) в конце импульса при пиковой тепловой нагрузке  $q = 0,5$  МВт/м<sup>2</sup>

На рис. 14, 16 видно, что максимальные напряжения Мизеса в графитовой плитке концентрируются в центральной части плитки и по величине составляют 1,65 МПа для  $q = 0,1$  МВт/м<sup>2</sup> и 10,3 МПа для  $q = 0,5$  МВт/м<sup>2</sup> при пределе прочности графита МПГ-8, равном 17 МПа. Максимальные напряжения в стальной стенке пренебрежимо малы.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для реконструируемого токамака Т-15 предложен вариант стальной конструкции первой стенки с графитовыми плитками из мелкозернистого графита МПГ-8.

Рассмотрены два варианта охлаждения графитовой плитки первой стенки:

- вариант 1 — передача тепла от плитки к стенке путём теплопроводности;
- вариант 2 — передача тепла от плитки к стенке только путём переизлучения тепла от плитки к стенке.

Термопрочностные расчёты показали преимущество варианта 2 конструкции первой стенки, когда охлаждение графитовой плитки происходит только путем теплового переизлучения на поверхность стальной стенки. В варианте 2 напряжения в стальной стенке пренебрежимо малы в отличие от варианта 1, где при возможной пиковой нагрузке  $q = 0,5$  МВт/м<sup>2</sup> в стальной стенке возникают упругопластические деформации. Напряжения в графитовой плитке допустимы при возможной пиковой нагрузке  $q = 0,5$  МВт/м<sup>2</sup> для обоих вариантов и пренебрежимо малы при номинальной тепловой нагрузке  $q = 0,1$  МВт/м<sup>2</sup>.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Островский В.С.** Искусственный графит. —Металлургия, М., 1986.
2. **Седов В.П.** Свойства конструкционных материалов на основе углерода. Справочник. — М., 1975.

Статья поступила в редакцию 25 февраля 2009 г.  
Вопросы атомной науки и техники.  
Сер. Термоядерный синтез, 2009, вып. 3, с. 39—42.



Андрей Валерьевич Клищенко, н.с., ветеран атомной энергетики и промышленности

при возможной пиковой нагрузке  $q = 0,5$  МВт/м<sup>2</sup> для обоих вариантов и пренебрежимо малы при номинальной тепловой нагрузке  $q = 0,1$  МВт/м<sup>2</sup>.