

УДК 621.039.634:669.27

ПЕРВАЯ СТЕНКА И ВАКУУМНАЯ КАМЕРА НЕЙТРОННОГО ИСТОЧНИКА ТИН-СТ

*А.В. Клищенко, Б.В. Кутеев, Ю.С. Шпанский
(РНИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия)*

В ходе данной работы были предложены и проанализированы несколько вариантов конструкции первой стенки и вакуумной камеры термоядерного источника нейтронов (ТИН) — токамака ТИН-СТ. В результате анализов выбрана оптимальная с точки зрения авторов конструкция.

Ключевые слова: токамак ТИН-СТ, первая стенка, вакуумная камера, сплав CuCrZr, вольфрамовое покрытие, термостойкость расчёт.

THE FIRST WALL AND VACUUM CHAMBER FOR A FUSION NEUTRON SOURCE BASED ON A SMALL SPHERICAL TOKAMAK (FNS-ST). A.V. KLISCHENKO, B.V. KUTEEV, Yu.S. SHPANSKY. Some first wall and vacuum chamber design variants was proposed and analyzed during this work. Optimal design was chosen by authors point of view.

Key words: tokamak FNS-ST, first wall, vacuum chamber, CuCrZr alloy, wolfram tile, thermal stress analysis.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Особенностями компактной установки ТИН-СТ [1] с точки зрения проектирования первой стенки и вакуумной камеры являются:

- малый размер большого радиуса 0,5 м;
- большая тепловая нагрузка на поверхность первой стенки $1,5 \text{ МВт/м}^2$, которая может иметь локальное пиковое значение до 5 МВт/м^2 ;
- стационарный режим работы;
- вакуумная камера при внешнем давлении до 5 атм;
- расположение вакуумной камеры непосредственно за первой стенкой или, по возможности, их функциональное и конструктивное совмещение, минимальная толщина первой стенки и вакуумной камеры.

Стационарный режим работы установки ТИН-СТ определяет, с одной стороны, отсутствие усталостных нагрузок на материалы конструкций, обращённых к плазме, а с другой, обуславливает возникновение пиковых значений температур и их перепадов по толщине конструкций для заданных тепловых потоков в отличие от нестационарных установок, где значения максимальных температур могут не достигать своих максимально возможных значений при ограниченном циклическом временном интервале прогрева конструкций.

Ожидаемые мощные тепловые потоки из плазмы на поверхность первой стенки определяют выбор конструкционных материалов, обеспечивающих эффективный отвод тепла от поверхности первой стенки и более равномерное распределение температур с их минимальным перепадом в конструкционном материале для минимизации термонапряжений.

Конструкция первой стенки и, в особенности, её элементы из конструкционного материала, несущего механические нагрузки, должны эффективно противостоять нагрузкам, возникающим от внутренних термонапряжений, — основным нагружающим факторам, определяющим работоспособность конструкции первой стенки данной установки.

Объёмное энерговыделение вносит несущественный вклад (порядка 5—10%) в разогрев первой стенки и практически не влияет на перепад температур по толщине. Особые требования надёжности конструкции первой стенки и выбора радиационно стойких материалов исходят также из невозможности её ремонта или замены её отдельных блоков с начала эксплуатации установки ТИН-СТ.

КОНСТРУКЦИЯ ПЕРВОЙ СТЕНКИ И ВАКУУМНОЙ КАМЕРЫ

Предлагаемая конструкция первой стенки для установки ТИН-СТ показана на рис. 1. Конструкция первой стенки состоит из рядов трубок из бронзового сплава CuCrZr с вольфрамовым покрытием с плоской поверхностью и связующими пластинами. В качестве защитного материала для первой стенки рассматривается вольфрам, устойчивый к распылению, высоким температурам и к нейтронным нагрузкам,

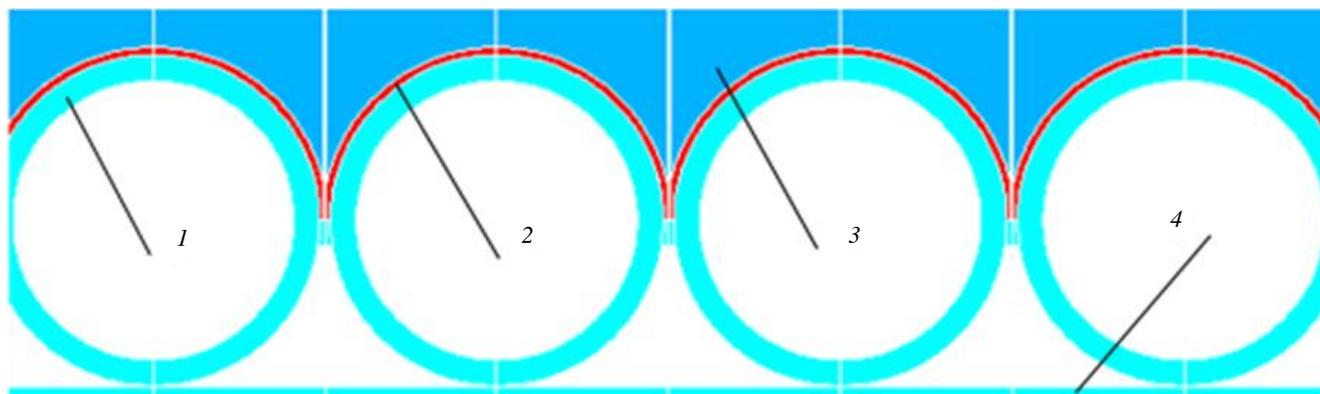


Рис. 1. Поперечное сечение первой стенки установки ТИН-СТ: 1 — трубки из бронзового сплава CuCrZr; 2 — промежуточный медный слой; 3 — седлообразное вольфрамовое покрытие; 4 — задняя связующая пластина из CuCrZr

имеющий высокую теплопроводность. Выбор данного медного сплава [2] обусловлен величиной тепловых потоков на первую стенку, сопоставимых с тепловыми потоками на диверторные экраны установки ИТЭР, где предполагается использование этого материала для изготовления трубок теплоносителя [3]. Всесторонние экспериментальные исследования свойств сплава CuCrZr выявляют радиационное охрупчивание материала при температуре ниже 150 °С, поэтому рабочая температура напряжённых участков конструкции из данного материала должна быть выше этой величины, что может быть определено выбором температуры теплоносителя. В качестве теплоносителя рассматривалась вода под давлением 0,5 МПа и при температуре 100 °С, которая может быть увеличена.

Основные характеристики установки ТИН-СТ:

- внешний диаметр трубок 10 мм;
- толщина стенок 1 мм;
- седлообразное вольфрамовое покрытие (тайлы) с плоской поверхностью, обращённой к плазме;
- вольфрамовое покрытие сегментировано по длине трубок с шагом 10 мм, со стороны плазмы является плоским, размером 10×10 мм;
- толщина тайла от 2 мм;
- толщина теплопроводящего и связующего промежуточного слоя между вольфрамом и медным сплавом 0,2 мм;
- промежуточный слой — медь;
- соединение тайлов с трубкой теплоносителя осуществляется пайкой;
- толщина задней связующей пластины или полос 0,4 мм;
- ряды полос перпендикулярны трубкам.

Вакуумная камера установки рассматривается как двухслойная оболочечная конструкция, расположенная непосредственно за первой стенкой:

- толщина вакуумной камеры 10 мм при толщине внутренней и наружной оболочки 1 мм;
- внутренняя и наружная оболочки соединены полосками толщиной 1 мм с шагом 10 мм (рис. 2);
- суммарная толщина первой стенки и вакуумной камеры менее 30 мм.

Материал вакуумной камеры сталь 316L. При стыковке отдельных элементов вакуумной камеры, а также в случае необходимости создания дополнительной жёсткости, например, для устойчивости к динамическим нагрузкам во время срыва тока плазмы, можно применить дополнительные силовые усиливающие элементы в тороидальном или

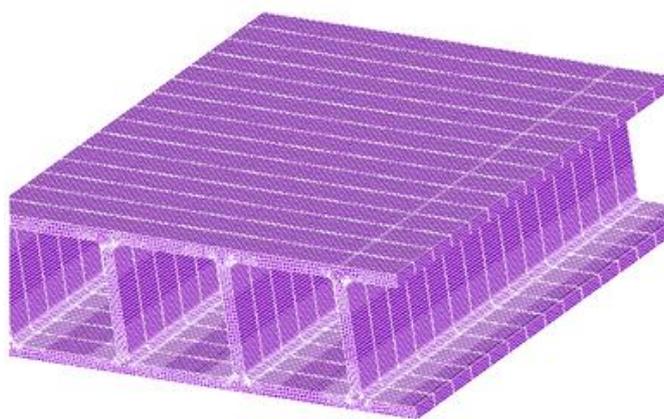


Рис. 2. Характерное сечение корпуса вакуумной камеры установки ТИН-СТ

(и) полоидальном направлении, образующие «раму» конструкции вакуумной камеры. Такая «рама» может быть использована как место крепления модулей первой стенки и оборудована для подвода-отвода теплоносителя для первой стенки. Конструкция вакуумной камеры может быть также секционирована в тороидальном направлении, что определяется технологическими возможностями её изготовления.

МОДЕЛИРОВАНИЕ И КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНЫЙ АНАЛИЗ

Моделирование и расчёты проводились при использовании конечно-элементной программы ANSYS. Конечно-элементная модель первой стенки — симметричная четверть вертикального сечения вдоль канала теплоносителя длиной 10 см показана на рис. 3.

Расчёт коэффициента теплоотдачи производился по методике, изложенной в работе [4].

Поле температур в трубке из CuCrZr с вольфрамовым покрытием для теплового потока $1,5 \text{ МВт/м}^2$ показано на рис. 4. Максимальная температура в тайле составляет $195 \text{ }^\circ\text{C}$.

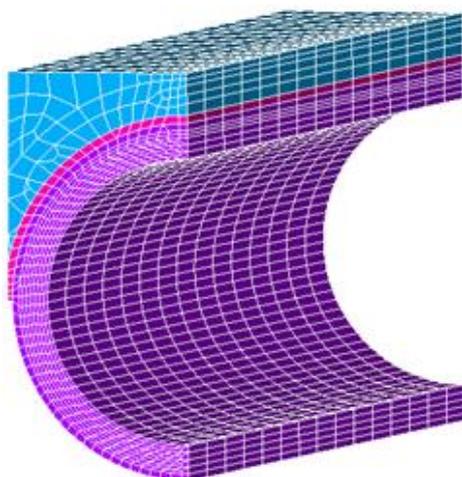


Рис. 3. Трубка теплоносителя с вольфрамовым покрытием и промежуточным слоем. Конечно-элементная модель

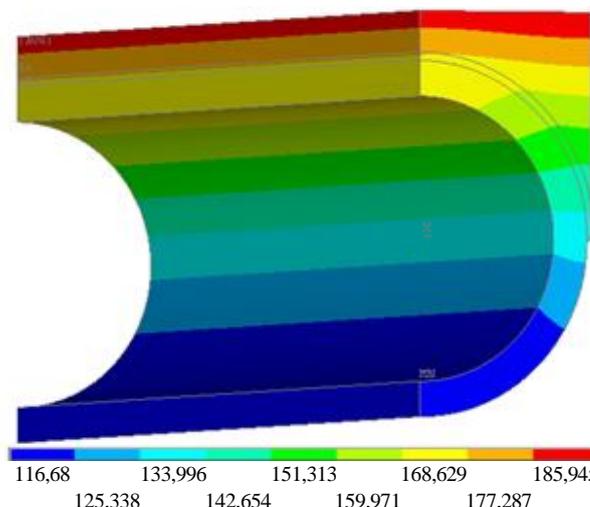


Рис. 4. Поле температур в трубке из CuCrZr с вольфрамовым покрытием, $^\circ\text{C}$

Максимальная температура в трубке составляет $177 \text{ }^\circ\text{C}$. Разность максимальной и минимальной температуры в трубке составляет $60 \text{ }^\circ\text{C}$. Перепад температур по толщине трубки со стороны теплового потока составляет $5 \text{ }^\circ\text{C}$.

Граничные условия для прочностного расчёта определялись возможностью осевого свободного температурного расширения и свободой изгиба канала теплоносителя. Максимальное эквивалентное напряжение Мизеса в трубке от давления теплоносителя незначительно — 3 МПа и поэтому в расчётах не учитывается.

В данной конечно-элементной модели вольфрамовое покрытие продольно не сегментировано по длине канала теплоносителя в отличие от рассматриваемой конструкции, но этого достаточно для получения поля температур для последующего термоупругого расчёта. Поэтому в термоупругом расчёте свойства связующего медного слоя задавались как вязко-пластические, т.е. фактически обеспечивали

независимость деформирования вольфрамового покрытия и трубки теплоносителя. В случае продольного сегментирования вольфрамового покрытия максимальные термонапряжения в вольфраме составляют 12 МПа .

Максимальное эквивалентное термонапряжение Мизеса в трубке из CuCrZr составляет 20 МПа (рис. 5).

Результаты расчётов показали, что в данной конструкции при тепловом потоке со стороны плазмы $1,5 \text{ МВт/м}^2$ максимальная температура в бронзовой трубке и вольфраме составила 177 и

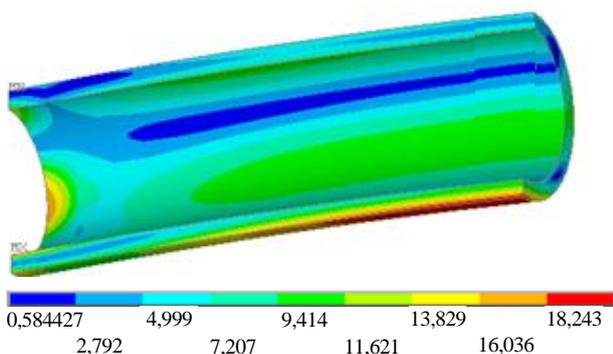


Рис. 5. Эквивалентное термонапряжение Мизеса (МПа) в трубке из CuCrZr

195 °С соответственно. Максимальные эквивалентные напряжения Мизеса 20 и 12 МПа, что значительно меньше предела упругости для данных материалов. При тепловом потоке 15 МВт/м² максимальные эквивалентные напряжения Мизеса составляют 200 МПа в бронзовой трубке и 120 МПа в вольфраме, что также меньше предела упругости для данных материалов.

Данная конструкция первой стенки способна выдерживать пиковые тепловые потоки до 10—15 МВт/м² и поэтому может рассматриваться как вариант для диверторных экранов установки ТИН. Предполагаемый ресурс первой стенки будет определяться количеством циклов работы установки — плановых и аварийных остановок, скоростью распыления и эрозии вольфрамового покрытия и радиационными повреждениями материалов первой стенки, определяющими критическое изменение их термомеханических свойств и геометрии.

На рис. 6 показано эквивалентное напряжение Мизеса в симметричной четверти оболочечной модели вакуумной камеры из стали 316L от внешнего атмосферного давления. Граничные условия конечно-элементной модели — запрет перемещений в осевом направлении узлов на её краях.

Распределение максимальных напряжений в оболочечной модели (см. рис. 6) позволяет оценить напряжённо-деформированное состояние вакуумной камеры в её сечении, исходя из осесимметричной модели расчёта (рис. 7). Радиус 0,5 м (центр установки слева). Максимальное эквивалентное напряжение Мизеса составляет 17 МПа. При внешнем давлении 5 атм максимальное эквивалентное напряжение Мизеса составляет 85 МПа.

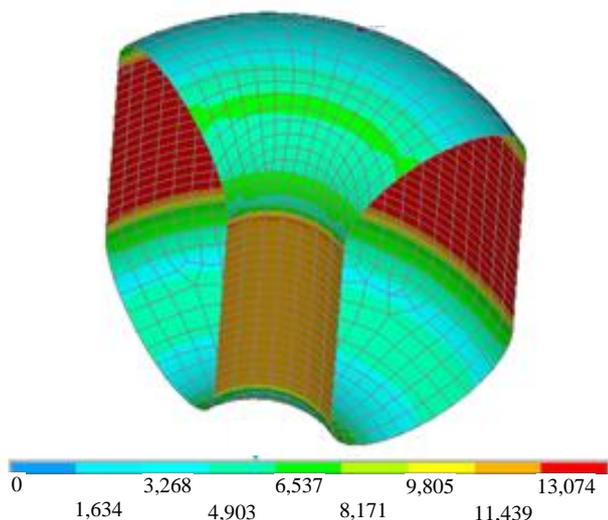


Рис. 6. Распределение эквивалентных напряжений Мизеса в симметричной четверти оболочечной модели вакуумной камеры от внешнего атмосферного давления

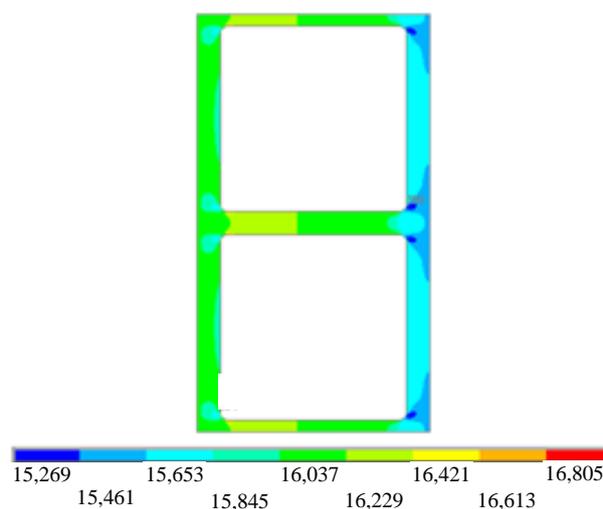


Рис. 7. Фрагмент вакуумной камеры. Эквивалентное напряжение Мизеса, МПа, только от внешнего давления 1 атм (давление справа). Осесимметричная модель расчёта. Радиус 0,5 м (центр установки слева)

Конструкция вакуумной камеры выдерживает внешнее статическое давление более 5 атм, может быть усилена рёбрами жёсткости для устойчивости к динамическим нагрузкам. Рёбра жёсткости могут использоваться для крепления коммуникаций и элементов первой стенки.

Расчёты обосновывают выбор конструкции, конструкционных и защитных материалов, а также способ охлаждения первой стенки.

REFERENCES

1. **Kuteev B.V., Bykov A.S. et al.** Key physics issues of a compact tokamak. — In: Fusion Neutron Source, IAEA, Fusion Energy Conf. Seoul, 2010.
2. **ITER** Material Properties Handbook. ITER Document № G74 MA16, 2005.
3. **Merola M.** EU R&D on Divertor Components, EFDA Close Support Unit, Garching, Germany, 2004.
4. **Kuteev B.V., Lukash V.E., Petrov V.S., Shpanskiy Yu.S.** Magnetic system of a compact spherical tokamak FNS-ST. — VANT. Ser. Termoyadernyi sintez (Problems of Atomic Science and Technology. Ser. Thermonuclear Fusion), 2010, issue 4, p. 40 (in Russian).

AUTHORS

Klischenko A.V. RRC «Kurchatov Institute», pl. Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia

Kuteev B.V. RRC «Kurchatov Institute», pl. Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia; kuteev@nfi.kiae.ru

Shpansky Yu.S. RRC «Kurchatov Institute», pl. Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia

Received 5 October 2010

Problems of Atomic Science and Technology
Ser. Thermonuclear Fusion, 2010, issue 4, pp. 36—39.