УДК 621.039.634

ОЦЕНКА ВОЗМОЖНЫХ АВАРИЙ В ПЕРВОЙ СТЕНКЕ ТЕРМОЯДЕРНОГО ИСТОЧНИКА НЕЙТРОНОВ, ВЫЗВАННЫХ ОТКАЗАМИ В СИСТЕМЕ ЕЁ ОХЛАЖДЕНИЯ

А.Ю. Пашков

НИИ «Курчатовский институт», Москва, Россия

Сделана оценка возможных последствий аварий с потерей теплоносителя (LOCA) и потерей потока теплоносителя (LOFA) в системе охлаждения первой стенки проектируемого термоядерного источника нейтронов (ТИН). Построены деревья событий для таких аварий. Проведены расчёты двумерных нестационарных полей температуры в сечении первой стенки. Даны рекомендации по совершенствованию конструкции ТИН.

Ключевые слова: авария с потерей теплоносителя, авария с потерей потока теплоносителя, ТИН, деревья аварийных событий.

ANALYSIS OF POSSIBLE ACCIDENTS IN THE FIRST WALL OF THE FNS INSTALLATION, INITIATED BY REFUSIONS IN ITS COOLANT SYSTEM

A.Yu. Pashkoff

NRC «Kurchatov Institute», Moscow, Russia

The appraisal of possible consequences for loss of coolant accident (LOCA) and loss of flow accident (LOFA) in the first wall coolant system of fusion neutron source (FNS) was done. The fault trees of these accidents were built. The calculations of two-dimensional transient temperature in the first wall section was carried out. The recommendations for the improvement of FNS-installation design were given.

Key words: loss of coolant accident, loss of flow accident, fusion neutron source, fault trees.

ВВЕДЕНИЕ

Первая стенка (ПС) — один из наиболее энергонапряжённых элементов установки ТИН, эскизный проект которой предложен в [1]. Как показывают оценки, даже кратковременный перерыв в процессе охлаждения ПС может привести к утрате её работоспособности и серьёзной аварии всей установки. Наиболее вероятными авариями системы охлаждения ПС представляются аварии типа LOCA (с потерей теплоносителя) и LOFA (с потерей течения теплоносителя). Некоторые из возможных причин таких аварий приведены в [2]. Для уточнения характеристик системы охлаждения были проведены расчёты нестационарных полей температур в элементах ПС при различных сценариях протекания аварии. Целью расчётов было определение времени от начала аварии до достижения температуры плавления конструкционных материалов ПС, т.е. до утраты её работоспособности.

КОНСТРУКЦИЯ ПЕРВОЙ СТЕНКИ

В процессе эскизного проектирования разработана оригинальная конструкция ПС и вакуумной камеры ТИН, реализовано их функциональное и конструктивное совмещение.

Особенностями ТИН являются:

- малые размеры большого и малого радиусов 0,5 и 0,3 м соответственно, что определяет общие размеры ПС её элементов;
- большие тепловые нагрузки на поверхность ПС $q_{\text{пс}}$ в среднем 1,5 МВт/м², локальные — пиковые значения могут достигать 5 МВт/м²;
- средняя нейтронная нагрузка на ПС 0,2 МВт/м²;
- стационарный режим работы;
- минимальная толщина сечений ПС из-за необходимости минимальной толщины конструкционных материалов и водяного теплоносителя для улучшения нейтронного баланса в гибридной системе.

Исходя из этого, предложена следующая конструкция: ПС состоит из внутренней и наружной частей, которые разделяются на 12 секций. Схема одной из секций наружной части ПС (в дальнейшем

будем называть её просто секцией) представлена на рис. 1 (выделены рёбра жесткости). Ширина секции в самой широкой части $\sim 0,42$ м, в самой узкой (верхней и нижней частях) $\sim 0,34$ м. Длина секции вдоль наружной образующей $\sim 1,5$ м, толщина 11,65 мм.

Каждая секция имеет автономную систему охлаждения (СОХ). Теплоноситель (вода с температурой на входе $T_{\text{вх}} = 50$ °С и давлением 1 МПа, температура на выходе $T_{\text{вых}} = 100$ °С) течёт внутри каждой секции снизу вверх.

ПС представляет собой замкнутую оболочку тороидальной формы, ограничивающую плазменную камеру, где происходит термоядерная реакция. Секция ПС представляет собой две тонкостенные скреплённые оболочки — стальную (сталь 316L, обозначенная фиолетовым цветом) и бронзовую (CuCrZr, обозначенную голубым цветом), между которыми течёт теплоноситель (рис. 2). Бронзовая внутренняя оболочка (со стороны плазмы) имеет множество углублений (пуклёвок) по всей площади оболочки, расположенных рядами на равном расстоянии друг от друга. Первая стенка ТИН является и вакуумной границей. Внешняя стальная оболочка толщиной 1,5 мм, усиленная рёбрами жёсткости, выполняет функцию как вакуумной камеры, так и каркаса для внутренней оболочки с установленными на ней бериллиевыми тайлами, обозначенными синим цветом на рис. 3.

Рис. 1. Схема одной из секций наружной части первой стенки

Рис. 2. Первая стенка в разрезе

Рис. 3. Сечение первой стенки по периметру тайла

К внутренней поверхности ПС посредством промежуточного медного слоя (обозначенного розовым цветом) прикрепляются без зазоров бериллиевые тайлы. Форма тайлов сопрягается с формой углублений и поверхностью бронзовой оболочки.

Основные размеры сечения ПС обозначены на рис. 4.

Рис. 4. Основные размеры сечения первой стенки

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ РАСЧЁТА

Для дальнейшего анализа необходимо учесть предложения, сделанные в [1]:

— установка ТИН снабжена устройством автоматического гашения термоядерной реакции в плазме при любой аварии (в том числе аварии СОХ), угрожающей её безопасности;

— система охлаждения ПС включает в себя аварийную СОХ, которая включается в случае отказа основной СОХ (подобно тому, как это сделано для охлаждения активной зоны ядерного реактора).

Средняя тепловая мощность одной секции наружной ПС $Q_{сек} = q_{ПС} S_{сек} + Q_{внут}$, где $Q_{внут}$ — внутреннее тепловыделение в конструкционных материалах ПС, Вт.

Внутреннее тепловыделение в конструкционных материалах ПС зависит от нейтронной нагрузки на неё, которая, в свою очередь, будет зависеть от параметров плазмы и материального состава blankets (при наличии в blankets замедлителя и делящихся изотопов нейтронная нагрузка на ПС возрастёт). При заданных характеристиках ТИН оценочные значения удельного тепловыделения в материалах ПС при стационарном режиме работы [1, 3], которые дают возможность определить $Q_{внут}$, и основные характеристики ПС, служащие исходными данными для расчёта, следующие:

Площадь поверхности наружной части (внутренней части) первой стенки, м ² ...	6 (4)
Площадь поверхности одной секции наружной части первой стенки $S_{сек}$, м ² ...	0,5
Объём одной секции наружной части первой стенки $V_{сек}$, м ³ ...	0,0058
Средняя тепловая мощность одной секции первой стенки $Q_{сек}$, МВт ...	0,78
Внутреннее тепловыделение в конструкционных материалах секции, МВт ...	0,03
Расход воды на охлаждение одной секции, кг/с ...	3,7
Объёмная доля конструкционных материалов в одной секции, %	
(удельное тепловыделение в материале, МВт/м ³):	
бериллий ...	39 (3)
медь ...	6 (7)
бронза ...	11 (6)
вода ...	29 (4)
сталь (без учёта рёбер жёсткости) ...	15 (7)

Согласно [1] после гашения термоядерной реакции внутреннее тепловыделение в конструкционных материалах ПС за 1 с уменьшается в 10 раз по сравнению с значениями при стационарном режиме работы. В дальнейшем, через одни сутки, внутреннее тепловыделение уменьшится в 100—200 раз по сравнению с значениями при стационарном режиме работы, а затем продолжит медленно уменьшаться до практически нулевых значений. Для дальнейшего анализа сделаем допущение, что после гашения термоядерной реакции внутреннее тепловыделение остаётся постоянным во времени с значениями в 10 раз меньше по сравнению с значениями при стационарном режиме работы. Это допущение пойдёт в запас расчёта, так как реальные значения внутреннего тепловыделения будут меньше.

ВОЗМОЖНЫЕ СЦЕНАРИИ ПРОТЕКАНИЯ АВАРИИ ТИПА LOCA

Рис. 5. Дерево возможных событий при аварии с потерей теплоносителя

Аварии типа LOCA для ПС неоднократно исследовались применительно к установке ИТЭР [2, 4]. Как представляется, последовательность событий при этом будет следующей: разгерметизация системы охлаждения ПС внутри вакуумной камеры и истечение воды в плазменную камеру ТИН приведут к срыву плазмы и прекращению термоядерной реакции. Начнутся интенсивное испарение теплоносителя и рост давления в плазменной камере. Это будет сопровождаться взаимодействием воды и пара с горячим бериллиевым покрытием и дополнительной генерацией пара и водорода. При разгерметизации СОХ вне вакуумной камеры попадания воды в плазменную камеру не будет. Дерево возможных событий при аварии типа LOCA представлено на рис. 5.

Вариант 1С. При разгерметизации СОХ внутри вакуумной камеры и попадании воды в плазменную камеру срабатывает система гашения термоядерной реакции, затем срабатывает аварийная СОХ ПС. По своим последствиям для ПС этот вариант представляется самым лёгким — тепловой нагрузки со стороны плазмы не будет, остаточное тепловыделение в ней снимается аварийной СОХ. Повышения температуры ПС выше допустимого не будет.

Вариант 2С. Отличается от варианта 1С тем, что аварийная СОХ ПС не срабатывает. Теплоноситель вытекает из повреждённой ПС, и начинается разогрев её металлоконструкций за счёт остаточного тепловыделения и, возможно, тепла реакции бериллия с паром.

Вариант 3С. Отличается от варианта 1С тем, что не срабатывает система гашения термоядерной реакции. Но в данном случае это не имеет значения, так как реакция гаснет из-за попадания воды в плазменную камеру. Последствия для ПС те же, что и в варианте 1С.

Вариант 4С. Не срабатывают система гашения термоядерной реакции и аварийная СОХ ПС. По своим последствиям полностью совпадает с вариантом 2С.

Вариант 5С. Разгерметизация системы охлаждения ПС происходит вне плазменной камеры ТИН, и вода не попадает в неё. Срабатывают система гашения термоядерной реакции и аварийная СОХ ПС. По своим последствиям совпадает с вариантом 1С.

Вариант 6С. Отличается от варианта 5С тем, что аварийная СОХ ПС не срабатывает. Теплоноситель вытечет из повреждённой СОХ, и начинается разогрев конструкций ПС за счёт остаточного тепловыделения в них (но выделения тепла за счёт взаимодействия бериллия с водой и паром не происходит). Последствия для ПС будут как в варианте 2С.

Вариант 7С. Отличается от варианта 6С тем, что не срабатывает система гашения термоядерной реакции, но срабатывает аварийная СОХ ПС. По своим последствиям близок к режиму штатной эксплуатации — повышения температуры ПС выше допустимой не будет.

Вариант 8С. Вода вытекает из повреждённой СОХ ПС, но её попадания в плазменную камеру не будет, и не срабатывают системы гашения термоядерной реакции и аварийная СОХ ПС. Начнётся разогрев лишённой охлаждения ПС за счёт теплового излучения плазмы и внутреннего тепловыделения в конструкционных материалах.

Как представляется, наиболее опасными по своим последствиям для ПС будут варианты 2С и 8С.

РАСЧЁТНЫЙ АНАЛИЗ АВАРИИ ТИПА LOCA В ПЕРВОЙ СТЕНКЕ

Следует отметить, что процесс истечения воды из потерявшей герметичность СОХ ПС займёт несколько секунд или десятков секунд, и в это время будет продолжаться процесс её охлаждения. Сделаем допущение, что вода вытечет практически мгновенно и разогрев конструкционных материалов ПС начнётся сразу после момента аварии. В [1] показано, что при стационарном режиме работы максимальная температура бериллиевого тайла составит $\sim 350^\circ\text{C}$, медного слоя $\sim 220^\circ\text{C}$, бронзовой оболочки $\sim 200^\circ\text{C}$, стальной оболочки $\sim 130^\circ\text{C}$. Из этих материалов минимальной температурой плавления обладают бронза и медь: $\sim 900\text{—}1100^\circ\text{C}$. Расчёт показывает, что при аварии, протекающей по варианту 8С, средняя скорость разогрева конструкционных материалов лишённой охлаждения ПС составит $41^\circ\text{C}/\text{с}$. Это означает, что приблизительно через 18—20 с после начала аварии температура медного слоя и бронзовой оболочки достигнет температуры плавления.

При развитии аварии по варианту 2С разогрев конструкционных материалов ПС протекает лишь за счёт остаточного тепловыделения в них. При сделанных допущениях о величине остаточного тепловыделения скорость разогрева конструкционных материалов ПС составит $0,16^\circ\text{C}/\text{с}$. При такой скорости разогрева температура медного слоя и бронзовой оболочки достигнет температуры плавления лишь через 4500—5000 с.

ВОЗМОЖНЫЕ СЦЕНАРИИ ПРОТЕКАНИЯ АВАРИИ ТИПА LOFA

Авария типа LOFA в СОХ, как представляется, может быть вызвана следующими причинами:

— отказ одного или нескольких насосов;

- деформация одного или нескольких трубопроводов;
- попадание постороннего предмета в коллектор или трубопровод.

Общим следствием этих причин станет прекращение циркуляции теплоносителя в ПС без его истечения за пределы СОХ. В дальнейшем события могут развиваться по следующим вариантам, дерево событий для которых представлено на рис. 6.

Рис. 6. Дерево возможных событий при аварии с потерей потока теплоносителя

Вариант 3F. При прекращении циркуляции теплоносителя в ПС не срабатывает система гашения термоядерной реакции, но срабатывает аварийная СОХ. Этот вариант наиболее близок к штатному режиму работы ПС. Тепловыделение в ПС снимается аварийной СОХ, повышения температуры ПС выше расчетной не будет.

Вариант 4F. Отличается от третьего варианта тем, что сначала не срабатывает система гашения термоядерной реакции, затем не срабатывает аварийная СОХ. По своим последствиям для ПС это самый тяжёлый вариант. Начнётся разогрев ПС и теплоносителя за счёт теплового излучения плазмы и тепловыделения в ней самой. Возможно повышение температуры ПС выше допустимой.

Расчёт показывает, что при развитии аварии по варианту 4F средняя скорость разогрева конструкционных материалов составит 13 °C/с. Из этого следует, что уже через несколько секунд начнутся кипение теплоносителя и рост давления в СОХ до значений выше допустимого, что может привести к её разгерметизации. Далее авария будет развиваться по варианту LOCA.

ВЫВОДЫ

При аварии типа LOCA наиболее опасным по своим последствиям является вариант, когда охлаждение ПС потеряно, а термоядерная реакция продолжается. За время порядка 18—20 с ПС может разогреться до температуры, когда будет потеряна её работоспособность.

Авария типа LOCA, при которой отсутствует термоядерная реакция и разогрев ПС происходит только за счёт остаточного тепловыделения в её конструкционных материалах, не представляет большой угрозы безопасности. Время достижения температуры ПС, когда будет потеряна её работоспособность, составляет 4500—5000 с. В действительности за счёт уменьшения остаточного тепловыделения в конструкционных материалах ПС это время будет ещё больше.

При аварии типа LOFA наиболее опасным по своим последствиям является вариант, при котором продолжается термоядерная реакция, а циркуляция теплоносителя в ПС потеряна. Давление в СОХ может повыситься до значений выше допустимого за несколько секунд, что может привести к разгерметизации СОХ и переходу аварии в аварию типа LOCA. Для предотвращения подобной ситуации желательно иметь устройство, исключающее повышение давления в СОХ выше допустимого.

Система гашения термоядерной реакции должна быть сделана максимально надёжной (возможно, включать в себя несколько независимых способов гашения реакции), чтобы исключить продолжение термоядерной реакции при любой аварии, угрожающей безопасности ТИН.

Необходимо продумать конструкцию аварийной СОХ. Система, подобная той, что применяется в ядерных реакторах, при её срабатывании может привести к попаданию больших количеств воды из неё в плазменную камеру ТИН, облицованную бериллием. Это нежелательно из-за возникновения реакции бериллия с водой и паром и генерации больших количеств водорода и тепла.

В расчётах не учитывалось, что ПС будет иметь проходки для системы подачи топлива, диагностики, дополнительного нагрева плазмы и др. Необходимо продумать конструкцию этих устройств и способы их охлаждения.

REFERENCES

1. **Sketch** project of a demonstration fusion neutron source (FNS) with a D-T fusion capacity of not less than 10 MW. Report of NRC «Kurchatov institute». Inv. № 230-15/6971 of 5 December 2012. (in Russian).
2. **Kurbatov D.K., Pashkov A.Yu.** Probabilistic analysis of ITER severe accident caused by the failure of the cooling system of the first wall. — VANT. Ser. Termoyadernyi sintez (Problems of Atomic Science and Technology. Ser. Thermonuclear Fusion), 1993, issue 1—2, pp. 12—17 (in Russian).
3. **Development** of technical specifications on the schematic design of a demonstration fusion neutron source (FNS). Phase 2, intermediate. Report of NRC «Kurchatov institute». Inv. № 140-17/6909-11 of 15 August 2011. (in Russian).
4. **Moshkin S.A.** Analysis of consequences of accidents in the cooling system of the first wall and blanket. — VANT. Ser. Termoyadernyi sintez (Problems of Atomic Science and Technology. Ser. Thermonuclear Fusion), 1991, issue 4, pp. 25—29 (in Russian).

AUTHORS

Pashkoff A.Yu. NRC “Kurchatov Institute”, pl. Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia;
A_Yu_pashkoff@mail.ru

Received 20 February 2013
Problems of Atomic Science and Technology
Ser. Termoyadernyi sintez, 2013, vol. 36, issue 3, pp.96—101