

04;12

## Концепция миксины для экспериментального реактора галатей

© А.И. Морозов, В.А. Невровский, В.И. Пистуневич, А.Н. Свечкопал

Российский научный центр "Курчатовский институт",  
123182 Москва, Россия

(Поступило в Редакцию 2 марта 1998 г.)

Плазменные ловушки типа галатей [1] содержат проводники с током, погруженные в плазму. Такие проводники названы миксинами. Миксины являются специфическими элементами галатей [2], поэтому анализ возможных конструкций миксин является насущной задачей при переходе к галатее как к термоядерному реактору.

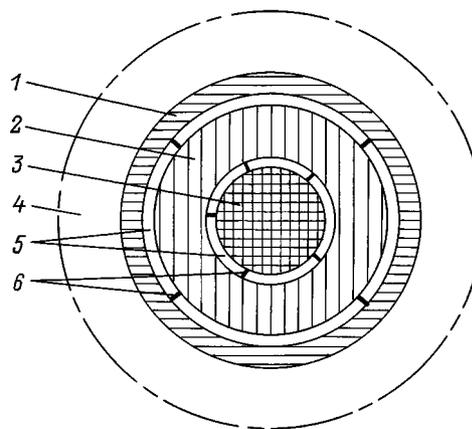
В настоящей работе рассмотрены основные аспекты конструкции миксины со сверхпроводящей хордой для демонстрационного реактора — галатей с длительностью импульса около 1000 с. Параметры миксины должны сохраняться при горении  $DT$ -плазмы, из которой падает на поверхность миксины поток нейтронов  $1 \text{ MW}/\text{m}^2$ . Основные черты описываемой ниже конструкции миксины изложены на конференциях [3,4].

Рассматривается трехзонная (или трехоболочечная) радиационно-аккумулятивная миксина, в которой внешняя ("красная") оболочка нагревается до температуры  $T \sim 2000 \text{ K}$  и эффективно излучает до 90% падающего на нее из плазмы потока энергии ( $1 \text{ MW}/\text{m}^2$ ). Следующий слой ("серый") отделен от красного многослойным вакуумным экраном с тепловой изоляцией (ВЭТИ) и должен уменьшать поток энергии на сверхпроводник примерно в 1000 раз. Наконец, третья ("голубая") зона является криозоной. Сверхпроводящая обмотка из  $\text{Nb}_3\text{Sn}$  погружена в водородную шугу (смесь жидкого и твердого водорода). Здесь температура сверхпроводника определяется точкой плавления водорода  $T = 14 \text{ K}$ . В рабочем состоянии температура может подниматься до 17 К (температура испарения водорода при 1 ат), при которой еще сохраняется сверхпроводящее состояние  $\text{Nb}_3\text{Sn}$ . Криозона также отделена от серой зоны с помощью ВЭТИ, чтобы уменьшить тепловой поток в криозону. Задача заключается в определении величины транспорта и поглощения в конструкции миксины нейтронов и гамма-квантов. В работе приводятся результаты предварительных расчетов по коду MCNP [5], рекомендованному для расчетов нейтроники ИТЭР, распределения энергии по малому диаметру миксины, который принят 1.7 м, а ее объем разбит на 15 слоев. Удельная теплоемкость материалов, которые могут быть использованы в миксине, изменяется от 1.6 до  $3.6 \text{ J}/\text{cm}^3 \text{ K}$  для C, Si, W и Fe соответственно. Оценки показывают, что средняя температура миксины должна достигать  $\sim 2000 \text{ K}$  после 1000 с термоядерного импульса, если охлаждение отсутствует. Поэтому излучение основной части энергии красным слоем приводит к ограничению температуры миксины. Рассмотрим более детально каждую зону миксины.

Основные требования к красной зоне состоят в том, чтобы примерно 90% энергии нейтронов и гамма-квантов поглощалось в ней, материалы имели низкую упругость паров при 2000 К и толщина красной зоны была бы минимальной. С учетом этих требований был выбран вольфрам, который позволяет при толщине 10–15 см иметь десятикратное уменьшение потока энергии нейтронов и гамма-квантов при низкой упругости паров ( $\sim 10^{-11} \text{ Torr}$  при  $\sim 2000 \text{ K}$ ). Его теплопроводность  $\sim 100 \text{ W}/\text{mK}$ , коэффициент температуропроводности  $\sim 0.4 \text{ cm}^2/\text{s}$ . Важнейшей особенностью вольфрама является также большое нейтронное альbedo, которое в нашей модели достигало  $\sim 60\%$ .

Толщину серой зоны с учетом ВЭТИ выбрали 45 см. Скорость подъема температуры слоя в данной работе оценивалась пренебрегая тепловой проводимостью ВЭТИ ( $\lambda \sim 0$ ). Основным материалом его является нержавеющей сталь. Кроме того, для замедления быстрых нейтронов и уменьшения энерговыделения в серой зоне 3 слоя были на основе воды.

В голубой зоне (криозона) расположена сверхпроводящая хорда из  $\text{Nb}_3\text{Sn}$ , погруженная, как упоминалось выше, в водородную шугу с теплотой плавления  $4.2 \text{ J}/\text{cm}^3$ . Малый радиус криозоны составляет 25 см, охлаждаемый объем одного погонного метра миксины примерно равен  $0.2 \text{ m}^3/\text{m}$ , толщина сверхпроводящей катушки составляет около 5 см при малом радиусе 20 см, общее сечение сверхпроводника  $\sim 630 \text{ cm}^2$ . Допустимая энергия на сверхпроводник составляет  $\sim 0.8 \text{ MJ}/\text{m}$ .



Поперечное сечение миксины: 1 — красная зона, 2 — серая зона, 3 — голубая зона, 4 — магнитный слой миксины, 5 — вакуумные экраны (ВЭТИ) с тепловой изоляцией (6).

Распределение энерговыделения нейтронов и гамма-квантов по 15 слоям сечения миксины

Слой	Материал	$W, \text{W/cm}^3$
1	Водород	$1.82E - 03$
2	$\text{Nb}_3\text{Sn}$	$8.39E - 03$
3	Водород	$2.11E - 03$
4	Лед	$3.97E - 03$
5	SS	$1.56E - 02$
6	SS	$3.02E - 02$
7	SS	$1.06E - 01$
8	Лед	$4.52E - 02$
9	SS	$1.67E - 01$
10	SS	$2.63E - 01$
11	SS	$8.38E - 01$
12	Вода	$4.30E - 01$
13	Вольфрам	$2.08E + 00$
14	”	$2.35E + 00$
15	”	$5.38E + 00$

Примечание. Величина каждого слоя 5 см, слои 1–3 — криозона; слои 4–12 — серая зона; слои 13–15 — красная зона; слои 4, 8, 12 — вода; слои 1 и 3 — водородная шуга.

Поток мощности на  $\text{Nb}_3\text{Sn}$  ограничивается величиной  $800 \text{ W/m}$  при времени импульса 1000 с.

Конструкция миксины предполагает наличие тепловых мостов, проходящих через ВЭТИ и связывающих серую зону с красной зоной и криозоной. Оценки показывают, что тепловые потоки, перетекающие через тепловые мосты, значительно меньше, чем поток энергии, входящий с нейтронами и гамма-квантами. Исходя из прочности конструкции в красной зоне предполагается использовать вольфрам, а в серой и голубой зонах — нержавеющей сталь. Поперечное сечение миксины показано на рисунке. Толщина красной зоны (вольфрам) 15 см, толщина серой зоны с ВЭТИ 45 см и радиус криозоны 25 см.

Расчеты распределения тепла от нейтронов и гамма-квантов были выполнены для нескольких вариантов набора материалов по толщине миксины. Наиболее простой вариант набора материалов представлен в таблице, из которой следует, что 15 см вольфрама достаточно, чтобы поглотить основную долю энергии в красной зоне, а выделение при этом в криозоне уменьшается примерно в 1000 раз.

Определим ток в миксине, который необходим, чтобы вокруг нее образовался магнитный слой толщиной 50 см между границей плазмы и поверхностью миксины, для удерживания быстрых альфа-частиц от попадания на миксину. При магнитном поле  $B \sim 1 \text{ T}$  на внешней границе магнитного слоя ток в сверхпроводнике должен быть  $I_m \sim 7 \text{ MA}$  при выбранных размерах. Оценки показывают, что полная масса погонного метра миксины вместе с конструкцией составляет около 15 т. При этом левитирующее состояние миксины можно поддерживать дополнительным поперечным магнитным полем величиной около 0.03 Т.

Миксина является одним из основных узлов галатеи, поэтому оценка ее стоимости позволяет составить пред-

ставление о стоимости термоядерного реактора галатея в целом. В настоящее время трудно сделать абсолютную оценку стоимости. Однако можно провести сравнение ее стоимости со стоимостью экспериментального реакторатокамака ИТЭР.

Конструкцию миксины можно сравнить с одной секцией ИТЭР, имеющей одну тороидальную магнитную катушку вместе с радиационной защитой, т.е. с 1/20 частью ИТЭР. Отсюда следует, что стоимость миксины не может превышать 1/20 стоимости магнитной системы с радиационной защитой ИТЭР.

## Список литературы

- [1] Морозов А.И. // Письма в ЖТФ. 1990. Т. 16. Вып. 15. С. 86.
- [2] Морозов А.И., Хрипунов В.И. // Физика плазмы. 1992. Т. 18. № 7. С. 838.
- [3] Morozov A.I., Nevrovsky V.A., Pistunovich V.I. // Proc. VI Conf. on Engineering Fusion Problems. St.-Petersburg, 1997.
- [4] Morozov A.I., Nevrovsky V.A., Pistunovich V.I. // IAEA Technical Committee meeting on "Innovative Approaches to Fusion". Pleasanton (USA), 1997.
- [5] J. Briesmeister (Editor), NCNP — A General Monte Carlo Code for Neutron and Photon Transport, Version 3a/Ed. J. Briesmeister. 1986. LA-7396-M. Rev. 2.