

ВЕРТИКАЛЬНЫЙ ЛИТИЕВЫЙ ЛИМИТЕР ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ НА ТОКАМАКЕ T11-M

М.Ю. Жарков^{1,2}, А.В. Вертков¹, И.Е. Люблинский¹

¹ ОАО «Красная звезда»; ² МИЭМ НИУ ВШЭ

E-mail: MG-dist@yandex.ru

1. Введение

Для энергетических термоядерных реакторов не нашедшей решение проблемой является создание стационарно работающих энергонагруженных внутрикамерных элементов. Одним таким элементом является лимитер. Его основное назначение - защита стенок вакуумной камеры от воздействия высокотемпературной плазмы. Существующие материалы для внутрикамерных энергонагруженных элементов токамака, прежде всего вольфрам, бериллий, графит, имеют недостатки, среди которых растрескивание, распыление, оплавление, высокое зарядовое число и др.

Уникальные свойства лития, являются основой возможности его использования как элемента, контактирующего с плазмой токамака, кондиционирующего плазму, а также в качестве тритийвоспроизводящего материала и теплоносителя blankets термоядерного реактора. Ранее свойства лития изучались для использования в качестве эффективного теплоносителя ядерных энергетических установок [1].

Способность жидкого лития смачивать контактирующие с ним материалы, проникать в поры и трещины зависит от смачиваемости этих материалов литием и его поверхностного натяжения. Для лития в интервале температур 200 - 1300°C величина поверхностного натяжения определялась экспериментально.

Сравнивая величину поверхностного натяжения (в мН/м), при температуре плавления: для лития – 406, натрия – 200, калия – 112, рубидия – 87 и цезия – 71, можно видеть, что литий имеет максимальное значение этой характеристики [2]. Это в сочетании с низкой плотностью и определяет уникальные капиллярные свойства лития.

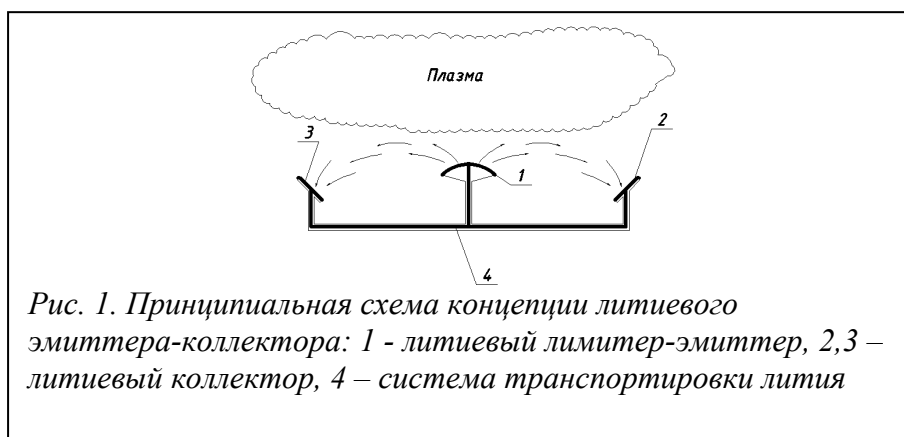
Высокое значение поверхностного натяжения лития обуславливает высокое капиллярное давление, которое может создаваться в литиевых капиллярных структурах.

Эти свойства лития позволили приступить к созданию нового типа литиевого лимитера вертикального исполнения. Разрабатываемый литиевый лимитер вертикального исполнения должен явиться прототипом лимитера, предназначенного для экспериментальной отработки физического принципа эмиттерно-коллекторной транспортной системы лития в условиях квазистационарного охлаждаемого литиевого лимитера на основе вольфрама при реализации программы испытаний литиевых лимитеров на токамаке T-11M [3].

2. Концепция литиевого эмиттера-коллектора

Основной принцип работы литиевого лимитера на основе капиллярно-пористой системы (КПС) заключается в том, что над поверхностью лимитера образуется плазменный слой лития и его естественных примесей, поглощающий энергию приходящего потока плазмы. Однако несмотря на хорошую совместимость лития с термоядерной плазмой, удаление лития из вакуумной камеры токамака – одно из важнейших технологических требований.

Исходя из этого, была разработана концепция литиевого эмиттера-коллектора, которая предполагала наличие литиевого эмиттера, расположенного в горячей области контакта горячей плазмы с лимитером, и литиевого коллектора, расположенного преимущественно в более холодной области, но в то же время в области, где собирается эмитированный литий. Эмиттер и коллектор должны быть соединены системой транспортировки лития для поддержания циркуляции лития в такой системе (рис. 1).



3. Литиевый лимитер вертикального исполнения

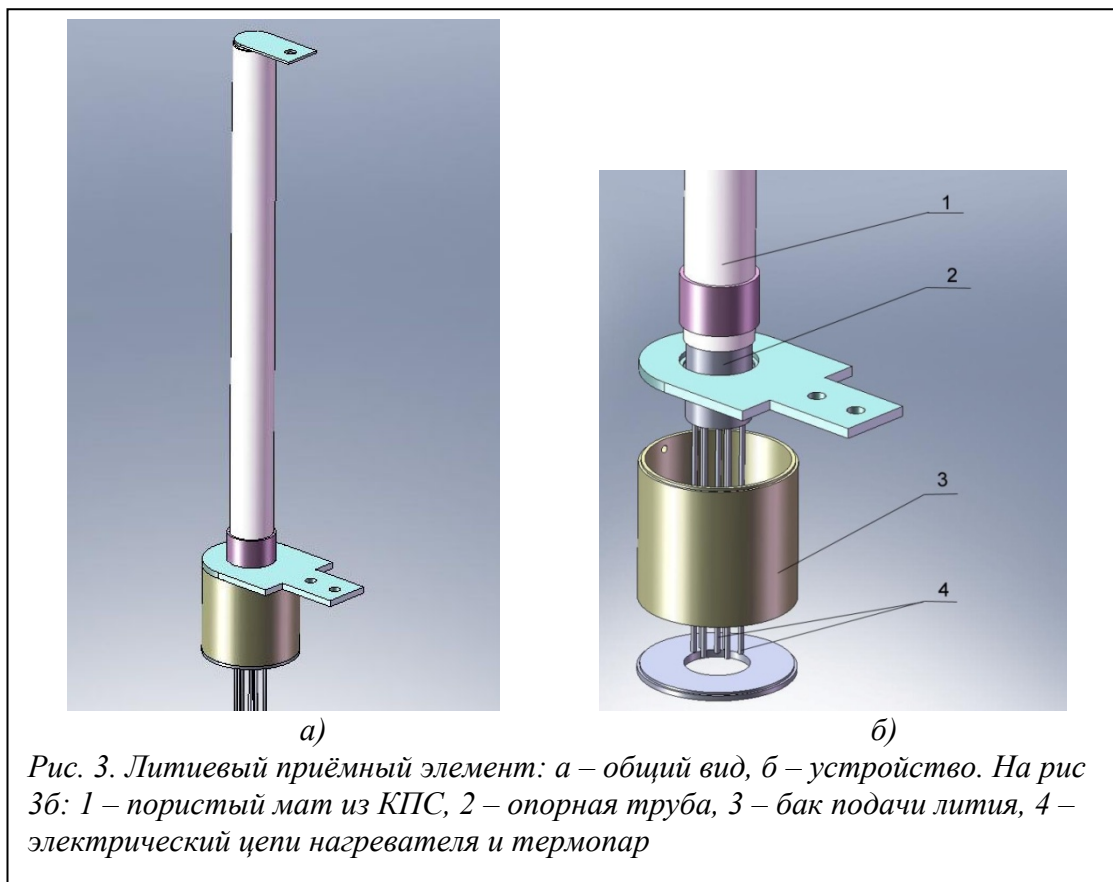
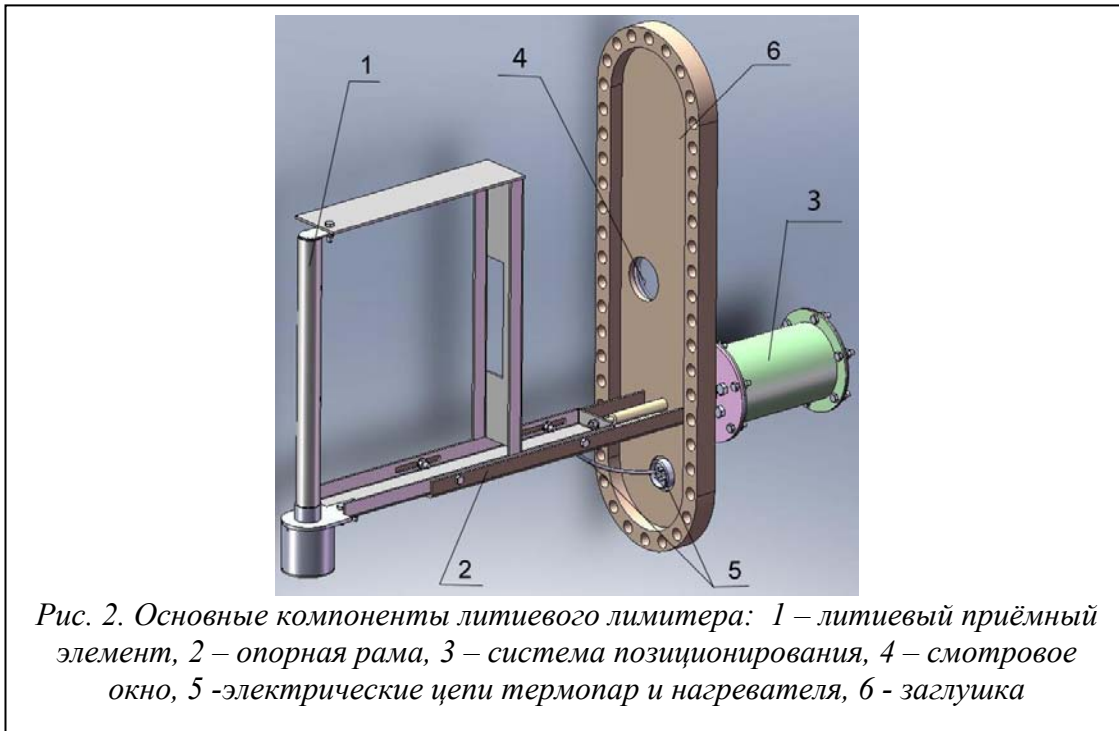
В рамках исследовательской программы на токамаке T11-M был сконструирован лимитер, реализующий концепцию литиевого эмиттера-коллектора.

На рис. 2 показаны основные элементы лимитера: литиевый приёмный элемент, опорная рама, система позиционирования, смотровое окно, электрические цепи термодар и нагревателя, заглушка.

Основной компонент лимитера – литиевый приёмный элемент (рис. 3). Литиевая поверхность приемного элемента макета лимитера имеет цилиндрическую форму и создается путем установки КПС на поверхность опорной трубы. Опорная труба аксиально вставлена в ёмкость подачи лития. При этом КПС имеет гидравлический контакт с литием, находящимся в питающей ёмкости. В процессе работы капиллярные силы поднимают литий вверх по КПС и восполняют его потери. Во внутренней полости опорной трубы располагаются электрический нагреватель и термоэлектрические датчики контроля температуры.

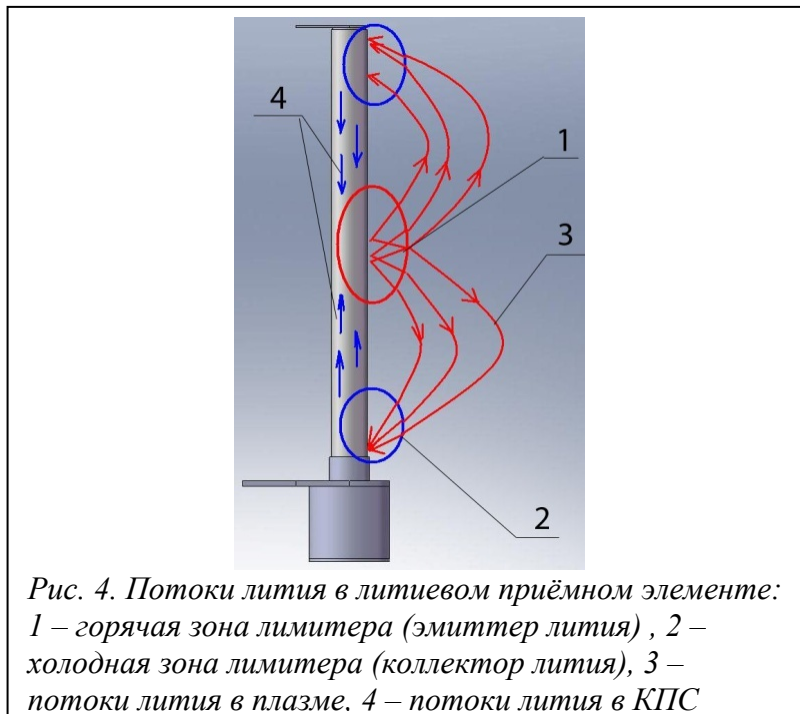
В качестве материала внешнего слоя капиллярно-пористой системы лимитера, располагающегося на теплоаккумуляторе, была выбрана сетка из

нержавеющей стали. В ходе изготовления лимитера сетка была тщательно обработана для обеспечения её смачиваемости литием.



4. Литиевый приёмный элемент как эмиттер-коллектор лития

Для реализации концепции эмиттера-коллектора литиевый приёмный элемент выполнен максимально возможной длины. Литиевый приёмный элемент контактирует с плазмой в локальной зоне, из которой в плазму

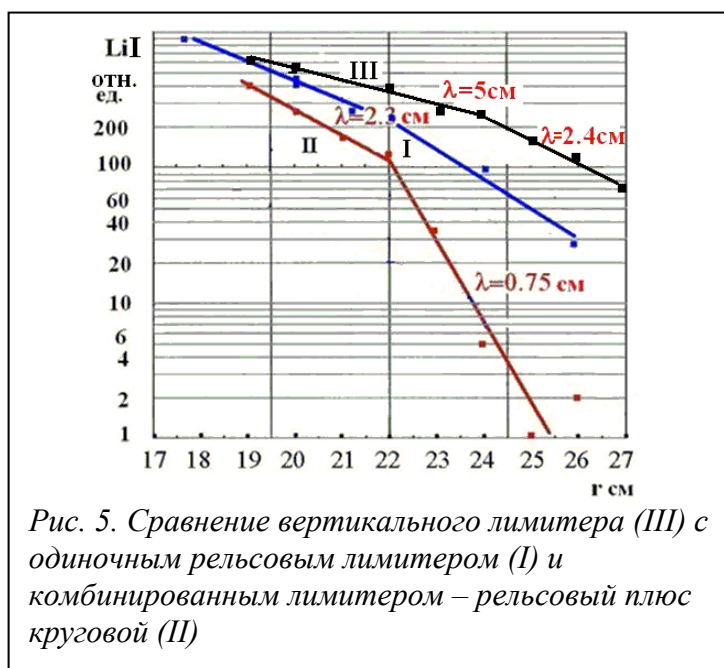


поступает литий. Концы приёмного элемента являются коллекторами лития, так как будучи «холодными» и удалёнными от точки контакта с плазмой улавливают литий. В таком исполнении КПС исполняет роль транспортной системы лития, в которой литий перемещается за счёт капиллярных сил от коллекторов лития (концы элемента) к эмиттеру лития (зона контакта с плазмой).

5. Результаты первых экспериментов на токамаке Т11-М с литиевым лимитером вертикального исполнения.

Созданный макет стационарного литиевого лимитера вертикального исполнения испытан на токамаке Т-11М.

Лимитер был установлен на внешнем обводе тора. Получены устойчивые разряды с длительностью до 200 мс. Показана работоспособность вертикального литиевого лимитера. На конец 2011 года произведено более 500 разрядов. Предварительные испытания лимитера показали, что все расчетные характеристики по удержанию лития капиллярно-пористой системой полностью соответствуют экспериментальным результатам. На рис. 5 показано сравнение вертикального лимитера (III) с одиночным рельсовым лимитером (I) и комбинированным лимитером – рельсовый плюс круговой (II).



Данные, представленные на рисунках, показывают, что описанный вертикальный литиевый лимитер позволяет существенно расширить зону распределения лития на периферии плазмы, что должно способствовать её охлаждению и уменьшению взаимодействия со стенкой.

1. Материаловедение жидкометаллических систем термоядерных реакторов / Г.М.Грязнов, В.А.Евтихин, И.Е.Люблинский и др. М.: Энергоатомиздат, 1989.
2. Жидкометаллические теплоносители / В.М.Боришанский, С.С.Кутателадзе, И.И.Новиков, О.С.Федынский М.: Атомиздат. 1976.
3. S. V. Mirnov et al., Fusion Eng. Des. (2011 doi :10.1016/j.fusengdes.20.11.10.005)