

# АГРЕГАТЫ ОЧИСТКИ ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕЙ КОСМИЧЕСКИХ ЯДЕРНЫХ ЭНЕРГОУСТАНОВОК

**Анатолий Семёнович Демидов**, д.т.н., профессор кафедры конструкций и проектирования двигателей, Московский авиационный институт МАИ (национальный исследовательский университет)

*Рассматриваются конструктивные схемы агрегатов, применяемых для очистки от примесей жидкометаллических теплоносителей (ЖМТ) космических ядерных энергоустановок (ЯЭУ). Отмечается, что холодные ловушки применяются только в земных условиях, а горячие могут быть включены в бортовой контур. Приводятся примеры схем и реальных конструкций, сравнение холодных и горячих ловушек по глубине очистки, а также концептуальный подход к применению последних в ЯЭУ большого ресурса (от года до нескольких лет)*

*Discusses the structural layout of the units applied for decontamination of liquid-metal coolants (LMC) space nuclear power units (npus). It is noted that cold traps are used only in terrestrial conditions, and hot traps can be included in the onboard circuit. Examples of schemes and real structures are given, comparison of cold and hot traps by depth of cleaning, as well as a conceptual approach to the use of the last in the large resource nuclear power plant (from a year to several years)*

**Ключевые слова:** ядерные энергетические установки, металлический теплоноситель, диффузионная ловушка.  
**Keywords:** nuclear power plants, metal coolant, diffusion trap.

В качестве теплоносителей для космических ядерных энергоустановок (ЯЭУ) с преобразователями различного типа (полупроводниковых, термоэмиссионных, машинных) наибольший интерес представляют эвтектический сплав натрий-калий и литий. Некоторые их физические свойства приведены в таблице 1 [1].

Таблица 1. Свойства жидкометаллических теплоносителей

Физический параметр	Литий	Сплав (22% Na+78% K)
Температура плавления, °C	179	- 11
Плотность, г/см <sup>3</sup> , при 200 °C	0,507	0,823
Теплоемкость, ккал/(кг·°C) при 200 °C	1,0	0,217
Температура кипения при 760 мм.рт.ст., °C	1317	784

Литий обладает существенными преимуществами перед сплавом натрий-калий в отношении плотности, теплоемкости и температуры кипения. Применение в космических ЯЭУ изотопа <sup>7</sup>Li, обладающего незначительным сечением поглощения нейтронов, обеспечивает дополнительное преимущество. В то же время высокая температура плавления лития приводит к необходимости иметь в контуре разогревающие элементы и, соответственно, к усложнению конструкции. Кроме того, по отношению к конструкционным материалам для лития характерна более высокая коррозионная активность [2].

В жидкометаллических системах могут присутствовать как нерастворимые, так и растворимые примеси, что приводит к увеличению скорости коррозии деталей, ухудшению работы теплообменного оборудования из-за выпадения поверхностного осадка и может вызвать даже закупоривание тракта. Нерастворимые примеси (сварочный шлак, опилки, жир) удаляются с помощью фильтров до загрузки и во время загрузки системы. Используются фильтры из пористого спеченного металла, проволочные сетки, металлическая стружка.

Очистка от растворимых примесей производится перед заправкой в контур с помощью так называемых холодных ловушек, которые принято подразделять по принципу подвода теплоносителя в зону осаждения примесей - за счет естественной или принудительной циркуляции. Вследствие того, что растворимость некоторых примесей резко падает с понижением температуры, они могут осаждаться на любую достаточно холодную поверхность в системе. Говоря в дальнейшем о холодных ловушках, будем иметь в виду очистку эвтектического сплава натрий-калий от кислорода, примеси которого по весу составляют наибольшую долю. Простейшая холодная ловушка представляет собой глухой отрезок трубы, приваренный открытым концом к трубопроводу с циркулирующим металлом. Так как примеси в зону кристаллизации попа-

дают путем диффузии, такое устройство называется холодной диффузионной ловушкой. В ней кристаллизация и накопление примесей осуществляются в одном объеме, поэтому такую ловушку называют еще однозонной [3]. В простейшей холодной ловушке примеси обычно накапливаются не только в наиболее удаленном конце, но и в ее горле (рис. 1). Для того, чтобы наиболее полно использовать объем ловушки, необходимо обеспечить последовательное перемещение зоны охлаждения (рис. 2). Это можно реализовать с помощью секционного подведения хладагента (рис. 3). Подвод примесей, если не предусмотреть специальных мер, зависит только от молекулярной диффузии и термодиффузии. Для турбулизации потока на входе в ловушку ее края вдвигают в магистраль. Геометрические параметры холодной однозонной ловушки характеризуются отношением диаметра к ее длине величиной 1/6 - 1/8.

На рис. 4 показана схема холодной ловушки другого типа, которая является проточной. Объем ловушки конструктивно разделен на три зоны: I - зону охлаждения; II - отстойник; III - зону фильтрации, поэтому она называется трехзонной. Скорость тока в такой ловушке 3 - 6 м/сек.

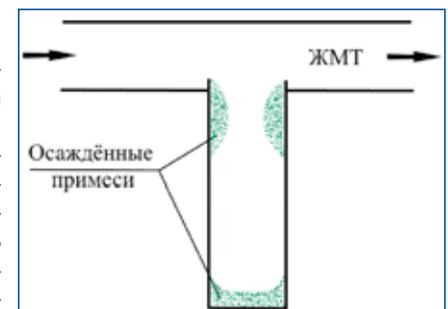


Рис. 1. Закупоривание входного участка простейшей холодной ловушки

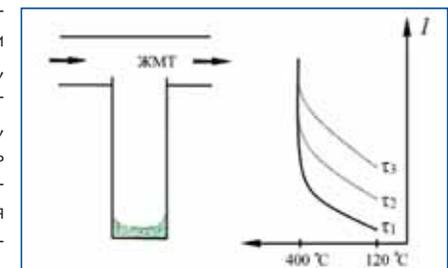


Рис. 2. Оптимальное изменение температурной кривой по длине l ловушки по времени ( $t_3 > t_2 > t_1$ )

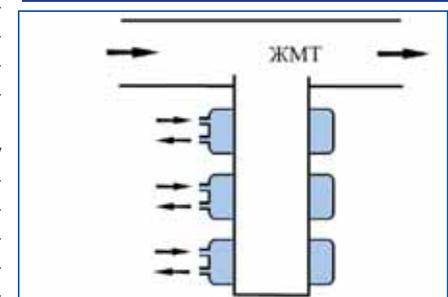


Рис. 3. Ловушка с секциями охлаждения, включаемыми последовательно

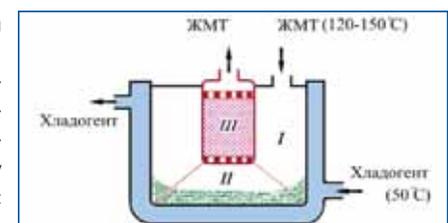


Рис. 4. Проточная трёхзонная ловушка I - зона охлаждения, II - зона осаждения примесей (отстойник), III - зона фильтрации

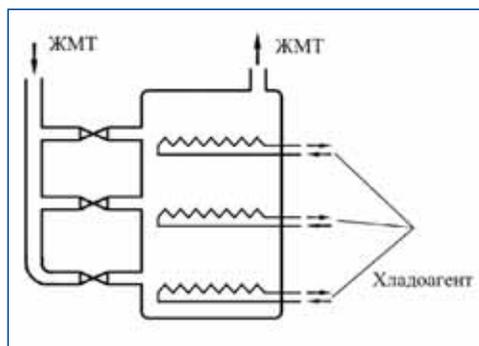


Рис. 5. Проточная однозонная ловушка

В зоне фильтрации плотность набивки стружкой из нержавеющей стали растет по направлению тока.

На рис.5 показана схема однозонной ловушки с принудительной циркуляцией. Перемешивание в зоне кристаллизации обеспечивается насосом. Секции холодильника включаются и работают последовательно, начиная с нижней.

Понятно, что такая ловушка также является проточной. Холодные ловушки применяются только при заправке жидкометаллических контуров космических ядерных энергоустановок и в наземных стендах.

Глубина очистки сплава натрий-калий по весу изъятых окислов может быть существенно выше (до 2,5 раз), если использовать так называемые горячие ловушки. В них применяются вещества, называемые геттерными агентами, или просто геттерами. В процессе горячей очистки происходят химические реакции, в которых более активные геттеры замещают в окисных соединениях основной металл. Для калия, например, реакции выглядят так:



Результаты этих реакций представляют собой довольно громоздкую запись, так как цирконий проявляет здесь переменную валентность. Из приведенной записи видно, что происходит очистка не только от кислорода, но и от водорода. Эффективность применения геттера из циркониевой фольги с исходной чистотой 99,9 % отражена в таблице 2.

Таблица 2. Эффективность применения геттера из циркониевой фольги

Примесь	В теплоносителе	В геттере после очистки
O <sub>2</sub>	0,05 %	2-3 %
H <sub>2</sub>	0,002 %	0,005 %

Реакция идет на поверхности фольги и постепенно ее покрывает окисная пленка. По достижении некоторой толщины пленка отслаивается и загрязняет жидкий металл. Кроме того, сама фольга, насыщаясь кислородом, постепенно охрупчивается и может разрушаться. Для того, чтобы это не происходило, фольга должна быть ограничена по весу. Допустимым считается ее относительный привес от 1,5 до 4 %. Формула общего вида:

$$\Delta P/S = K_0 e^{-Q/RT} \tau^n, \quad (3)$$

где  $\Delta P$  - абсолютный привес;  
 $S$  - площадь поверхности фольги;  
 $K_0$  - постоянная;  
 $Q$  - энергия активации геттера;  
 $\tau$  - время;  
 $n$  - постоянная,

при практическом использовании требует уточнения величин постоянных, то есть проведения специальных экспериментов.

Основными условиями нормальной работы горячей ловушки являются следующие:

1) Ловушка ставится в зоне оптимальных для хода химической реакции температур (для сплава натрий-калий это 550...650 °С). Если температура будет выше, то это приведет к быстрому разрушению фольги. При более низкой температуре скорость реакции резко падает.

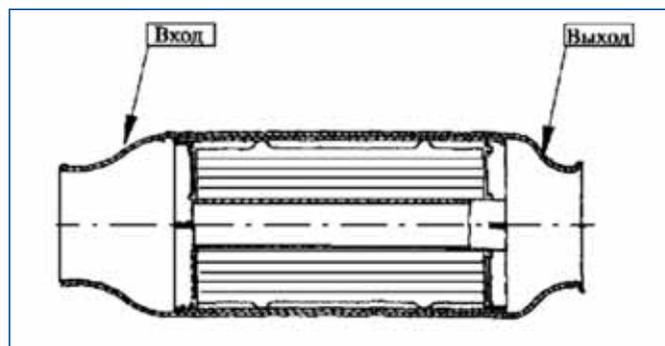


Рис.6. Горячая ловушка

2) Площадь поверхности геттера должна быть оптимальной. Если она больше, растет гидравлическое сопротивление ловушки. Если меньше, то скорость очистки мала, интенсивность очистки быстро падает, ловушка в целом обладает маленьким ресурсом. На практике площадь поверхности геттера подбирается так, чтобы содержание примесей в жидком металле контура после выработки ресурса ловушки понизилось в 3 - 5 раз.

3) Третьим условием является ограничение допустимого привеса, о чем было сказано выше.

Конструкция горячей ловушки, которая входила в состав реакторного контура космической ЯЭУ "Бук", показана на рис.6 [1]. Главной ее частью является так называемая вставка, собранная из пяти гладких и четырех гофрированных обечаек, изготовленных из полосы отожженного циркония. Гладкие и гофрированные обечайки в радиальном направлении чередуются. Пакет обечаек для удобства сборки заключен в тонкостенную цилиндрическую оболочку, в центральной части пакета устанавливается его силовая основа - трубка. На торцах пакета расположены крестообразные ребра, сваренные с трубкой и оболочкой. Собранная вставка размещается внутри корпуса ловушки. Его входной диффузорный участок для уменьшения гидравлического сопротивления выполнен удлиненным. Толщина фольги обычно составляет 0,15 - 0,2 мм. Ограниченный ресурс горячих ловушек является их недостатком, но проблему можно решить путем установки в контуре батареи ловушек. Этот способ может быть оправдан в случае применения ЯЭУ для длительного космического полета, например, при полете на Марс или спутники Юпитера. Каждая из батарейных ловушек контура может быть установлена на байпасе за своим клапаном. С помощью клапанов ловушки должны подключаться в контур последовательно по мере исчерпания своего ресурса.

Возвращаясь к теме применения лития, отметим, что в качестве теплоносителя его целесообразно использовать в реакторном контуре с максимальной температурой более 900°С для ЯЭУ высокой и особо высокой мощности. В то же время необходимо принимать во внимание, что применение горячих ловушек в бортовых контурах с литием в составе космических ЯЭУ является рискованным из-за того, что геттерный агент (цирконий, легированный титаном) после обволакивания себя окислами склонен самовозгораться. Решением вопроса может быть применение теплоносителя особо высокой чистоты, а также соответствующая очистка внутренней поверхности конструктивных узлов и магистралей контура. **□**

### Литература

1. Космические ядерные энергоустановки и электроракетные двигатели. Конструкция и расчет деталей. Под ред. заслуженного конструктора РФ П.В. Андреева. - М.: Издат.-во МАИ, 2014. - 508 с.
2. Субботин В.И., Арнольдов М.Н., Ивановский М.Н. и др. Литий. - М.: Издат.-во по Атомной науке и технике, 1999. - 263 с.
3. Жидкометаллические теплоносители ЯЭУ. Очистка от примесей и их контроль. Под ред. д.т.н. Ф.А. Козлова. - М.: Энергоатомиздат, 1983. - 128 с.

Связь с автором: demidov@mai.ru