

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕПЛОВЫХ ТРУБ В УСКОРИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКЕ

Ю.Г. Залеский, Г.А. Кривоносов, И.Н. Онищенко, А.Г. Пономарев
Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»,
Харьков, Украина
E-mail:gak@kipt.kharkov.ua

Проведены пробные испытания теплообменника, работающего на принципе тепловых труб (ТТ), установленного на сильноточную ионную пушку ускорителя заряженных частиц. Благодаря компактности и автономности разработанной конструкции удалось обойтись без бойлера, находящегося под потенциалом 100 кВ. Суммарная отводная мощность составляет 0.6 кВт. Температура элементов охлаждаемого устройства при этом не превышает 60 °С. Другое исследуемое применение ТТ в ускорительной технике - охлаждение мишеней, используемых как конвертеры для генерации рентгеновского излучения с использованием сильноточных пучков мощных импульсных ускорителей. В таком исполнении конвертеры в процессе эксплуатации дали положительные результаты для Мо и Та.

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время ведется интенсивная разработка линейных сильноточных ускорителей легких ионов (протонов, дейтронов). Для реализации программ фундаментальной ядерной физики, электроядерного метода получения энергии, а также ряда прикладных задач пучковых технологий требуется ускоритель на 1 ГэВ с током 100 мА [1,2]. Энергия и ток ускоренного пучка ионов должны при этом поддерживаться с высокой стабильностью на протяжении длительного времени (недели, месяцы). Стабильность параметров пучка на выходе ускорителя определяется стабильностью работы источника ускоряемых ионов – ионной пушки, в которой, в основном, и выделяется большое количество тепла в результате рассеяния СВЧ-энергии. Отвод выделяющегося тепла обычным водяным теплообменником (бойлером) оказывается несовместимым с требованием работы ионной пушки в продолжительном стационарном режиме. Наиболее эффективная система теплоотвода – это тепловая труба (ТТ) [3-6]. Проведены пробные испытания теплообменника, работающего на принципе тепловых труб, установленного на сильноточную ионную пушку (далее ионная пушка). Благодаря компактности и автономности разработанной конструкции удалось обойтись без бойлера. В результате проведенной работы по замене системы отвода тепла и стабилизации теплового режима ионной пушки традиционным теплообменником, теплообменником на ТТ, находящихся под высоким потенциалом, можно сделать вывод, что ионная пушка может работать неограниченное время без нарушения тепловых характеристик.

2. КОНСТРУКЦИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ МОДИФИЦИРОВАННОГО ИСПАРИТЕЛЬНОГО ТЕРМОСИФОНА

На Рис.1 показан поперечный разрез модифицированного испарительного термосифона (МИТ).

На внутренней поверхности теплоприёмника 1 нарезана неполная резьба с шагом 1,5 мм. В эту резьбу вворачивается патрон 2, на внешней поверх-

ности которого нарезана неполная резьба с шагом 1,5 мм. Пространство 3, образованное между теплоприёмником и патроном, служит каналом для стока конденсата и полостью для испарительной зоны. В нижней части патрона напротив места интенсивного притока тепла Q от внутренней поверхности теплоприёмника проделаны радиальные каналы 4 для прохода пара из испарительной зоны в центральную полую часть 5 патрона.

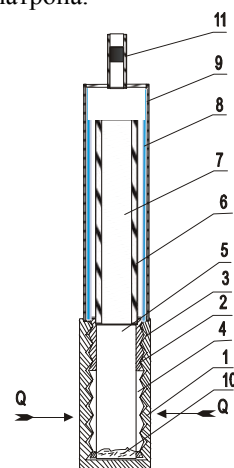


Рис.1. Поперечное сечение модифицированного испарительного термосифона

В верхний торец патрона вставлена тонкостенная труба 6, внутри которой движется пар 7, а снаружи – жидкость 8, которая стекает по внутренней поверхности кожуха 9. Все детали МИТ выполнены из меди и спаяны медно-фосфорным припоем. Во внутреннюю полость МИТ помещается рабочая жидкость (в рассматриваемом случае дистиллированная вода). Количество жидкости определялось из расчёта, чтобы в самом предельном режиме работы МИТ лужа 10 была минимальной. Откачка на вакуум собранного МИТ осуществлялась следующим образом. В вертикальном положении МИТ теплоприёмник помещался в холодильник с температурой минус 2...3°С. По истечении некоторого времени, когда лужа замерзала, через патрубок 11 производилась откачка воздуха до давления 10...2 мм рт.ст. Затем патрубок временно герметично закрывался, теплоприёмник нагревался до температуры 50...60°С и

при этой температуре МИТ находился около 10...15 мин (процесс выхода воздуха из объема жидкости). В дальнейшем снова теплоприёмник помещался в холодильник, и повторялась откачка освободившегося воздуха из жидкости. По мере достижения давления 10^{-1} мм рт.ст. патрубков зажимался и запаивался.

Для получения характеристик тепловых труб на основе тепловой трубы МИТ был изготовлен стенд. В качестве источника тепла изготовлена электрическая печь. Верхняя часть МИТ, т.е. область конденсата, помещалась в холодильник с проточной водой. По измеренным данным напряжения, силы тока, показаниям термопары, температуры входной и выходной воды и её количества были получены величины тепловых сопротивлений для тепловых труб. Они находились в пределах от 0,026 до 0,023°C/Вт при отводящей тепловой мощности от 500 до 2300 Вт. Температура конденсации 41...45°C, а температура испарителя 53...100°C. Таким образом, тепловое сопротивление тепловых труб на основе тепловой трубы МИТ в среднем в 2,5 раза меньше теплового сопротивления серийных тепловых труб типа Т-1314 и Т-1615. Стоимость таких несерийных тепловых труб на основе МИТ не превышала стоимости серийных тепловых труб. Применение тепловых труб типа МИТ может быть использовано при изготовлении бытовой техники [7,8].

3. ТЕПЛОВАЯ ТРУБА КАК ТЕРМОСТАТ ГЕНЕРАТОРА ПЛАЗМЫ ИОННОЙ ПУШКИ

Для реализации программ фундаментальной ядерной физики, электроядерного метода получения энергии, а также ряда прикладных задач пучковых технологий требуется ускоритель на 1 ГэВ с током 100 мА [1,2]. Энергия и ток ускоренного пучка ионов должны при этом поддерживаться с высокой стабильностью на протяжении длительного времени (недели, месяцы). Стабильность параметров пучка на выходе ускорителя определяется стабильностью работы источника ускоряемых ионов – ионной пушки.

В нашем случае источник ионов состоит из генератора плазмы и электродов для экстракции из плазмы ионов и фокусировки ионного пучка. Плазма создается в цилиндрическом резонаторе диаметром 100 мм и длиной 100 мм СВЧ-полями на частоте 2,45 ГГц при вводе 1,5 кВт СВЧ-мощности через вакуумно-плотное окно. Резонатор (в дальнейшем плазменная камера) помещен в магнитное поле соленоида, и ионизация напускаемого водорода осуществляется в условиях электронного циклотронного резонанса. Извлечение ионов происходит через отверстие в днище плазменной камеры при условии приложения к ней положительного потенциала величиной до 100 кВ.

В процессе поддержания плазмы часть СВЧ-энергии уходит с экстрагированным ионным пучком, а другая часть попадает на стенки плазменной камеры в виде бомбардирующих заряженных частиц, электромагнитного излучения плазмы, омических потерь СВЧ-токов, а также диэлектрических потерь на окне ввода СВЧ-мощности. Отвод выделяющегося

тепла обычным водяным теплообменником в нашем случае оказывается несовместимым с требованием работы ионной пушки в продолжительном стационарном режиме из-за часто возникающих коронных разрядов, переходящих в дуговые.

Автономность, компактность и отсутствие гальванической связи водяного контура с заземленными частями установки, свойственных ТТ [8], может оказаться подходящим способом охлаждения элементов ионной пушки, находящихся под высоким постоянным потенциалом.

При разработке экспериментального макета плазменной камеры с ТТ и схемы измерений его тепловых характеристик мы воспользовались опытом, описанным выше. Испаритель, близкий по форме и объему теплоносителя к будущему охлаждаемому элементу (водяная рубашка плазменной камеры), был изготовлен в виде кольца из медной трубы диаметром 10 мм. Для подвода тепла испаритель был обмотан нихромовой проволокой диаметром 1,2 мм через слюдяную изоляцию и подключен к регулируемому источнику переменного тока. Сверху обмотка была закреплена стеклолентой. Верхний край кольца был припаян к вертикальной трубе диаметром 30 мм и длиной 40 см. К нижнему краю кольца припаивалась труба для сбора конденсата. Вся сборка помещалась в емкость с сухим песком. Испаритель соединялся с радиатором-змеевиком отрезком медной трубы диаметром 30 мм, а конденсат стекал в нагреваемый элемент по 10 мм трубке. Температура конденсата и жидкости в испарителе измерялась термопарами так, как это показано на Рис.2.

Перед началом измерений охлаждающий контур через заливной штуцер заполнялся дистиллированной водой (1,5 л) и откачивался вакуумным насосом до давления 10...1 Торр. Затем штуцер перекрывался и трубопровод охлаждался тающим льдом до температуры 5...6°C. Примерно через час включалась повторная откачка и по достижении давления 10...1 Торр откачной штуцер запаивался. Описываемая процедура предназначена для удаления остатков атмосферного воздуха с целью понизить тепловое сопротивление водяному пару, поднимающемуся к радиатору.

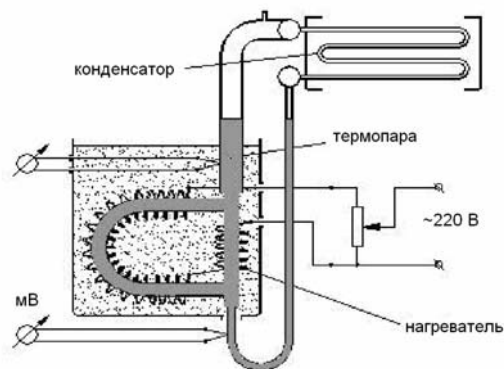


Рис.2. Схема экспериментального макета теплообменника на ТТ

В процессе исследований измерялся временной ход температуры испарителя при различных количествах подводимого тепла. Из этих кривых видно,

что независимо от мощности нагревателя температура испарителя стремится к некоторой постоянной величине. Эта величина определяется интенсивностью теплосъема с поверхности используемого радиатора. В нашем случае – естественного (конвективного) охлаждения радиатора, температура устанавливается на 60°C. При включении принудительного обдува радиатора с расходом воздуха примерно 2 м³/с температура испарителя могла быть понижена до 50°C.

В процессе исследований измерялся временной ход температуры испарителя при различных количествах подводимого тепла. На Рис.3 приведены соответствующие зависимости, снятые при различных значениях мощности нагревателя экспериментального макета.

Из этих кривых видно, что температура испарителя достигает насыщения при 60°C независимо от количества подводимой теплоты.

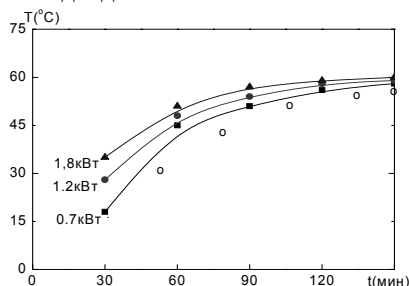


Рис.3. Зависимость температуры от времени при нагреве различной мощностью экспериментального макета испарителя, о – при нагреве ионной пушкой

Полученные данные эксперимента следует объяснить установлением динамического равновесия жидкость-пар в точке кипения 60°C при пониженном давлении насыщенного пара и использовать эффект для термостабилизации ионной пушки.

Схема ионной пушки изображена на Рис.4.

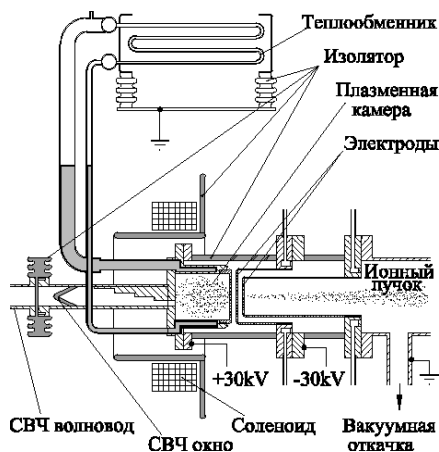


Рис.4. Схема действующего источника ионов, использующего ТТ

При испытаниях ТТ охладителя на генераторе плазмы ионного источника была воспроизведена та же процедура подготовки к измерениям, что и на макете: заполнение контура дистиллятом воды (1,5 л), откачка, охлаждение, повторная откачка, герметизация откачного штуцера.

В ходе испытаний измерялась СВЧ-мощность, поступающая в плазменную камеру, температура

наружной стенки камеры и время до установления постоянной температуры. СВЧ-генератор работал в непрерывном режиме и развивал мощность до 0,6 кВт. По мере увеличения СВЧ-мощности температура камеры увеличивалась, и при 0,6 кВт через 2 ч достигала 60°C. С течением времени температура камеры больше не увеличивалась, что следует объяснить установлением теплового равновесия, свойственного теплообмену в ТТ. Температурный ход кривой качественно согласуется с данными, полученными на макете (см. Рис.3).

Результаты, полученные при испытаниях теплообменника, работающего на принципе ТТ, можно резюмировать следующим образом. Данное устройство работает в составе ионной пушки, а так же как термостат генератора СВЧ-газоразрядной плазмы. Благодаря автономному замкнутому контуру, наполненному дистиллированной водой и не имеющему гальванической связи с заземленными частями установки, ТТ может работать неограниченное время под высоким постоянным потенциалом без нарушения тепловых характеристик. Применение его на ускорителе заряженных частиц, работающем в непрерывном технологическом процессе, позволяет решать широкий круг задач современной ядерной энергетики, переработки радиоактивных отходов, при создании новых материалов. Замена ТТ теплообменника с традиционными многоконтурными жидкостными устройствами с принудительной прокачкой теплоносителя насосами позволяет также избежать таких экологически вредных факторов, как повышенный уровень шума, вибрации и дополнительный расход электроэнергии. Вместе с высокой надежностью, экономичностью и безопасностью перечисленные достоинства устройств на основе ТТ позволяют считать их перспективными для применения в современной ускорительной технике.

4. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТТ ДЛЯ ОХЛАЖДЕНИЯ МИШЕНЕЙ, КОНВЕРТЕРОВ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Использование сильноточных релятивистских электронных пучков (РЭП) для генерации тормозного рентгеновского излучения имеет давние традиции. С созданием первых сильноточных электронных ускорителей получение мощных импульсов рентгеновского излучения было одной из важнейших задач при проведении экспериментальных исследований. Эта задача актуальна и в настоящее время. Однако необходимо отметить, что область применения генерированного излучения становятся прикладные исследования и, в частности, исследования радиационной стойкости материалов реакторостроения.

Большие интегральные дозы рентгеновского излучения, которые можно набрать в испытуемых материалах за короткое время при использовании сильноточных ускорителей, хорошо моделируют процессы, происходящие в конструкционных материалах действующих ядерных реакторов. Это позволяет прогнозировать поведение используемых материалов в реальных условиях, создавать и испытывать материалы с новыми уникальными свойствами.

Эти задачи налагают определенные условия на характеристики получаемого излучения, а именно: импульсы излучения должны быть достаточно мощными, чтобы доза набиралась за короткое время (несколько десятков пусков ускорителя), и необходима хорошая повторяемость генерируемого рентгеновского импульса в процессе облучения. Эти условия можно обеспечить только применением в качестве мишеней-преобразователей (конвертеров излучения) тяжелых металлов – W, Ta, геометрические характеристики которых в процессе облучения остаются неизменными. При этом для обеспечения минимума поглощения генерируемого излучения в материале самой мишени ее толщину делают несколько больше длины свободного пробега электронов пучка, что может приводить к ее повреждению за счет различных эффектов, сопровождающих взаимодействие пучка и твердотельной мишени. Хрупкие материалы, такие как вольфрам, могут растрескиваться и полностью разрушаться при резком термоударе электронным пучком, а танталовая фольга проплавляется образующейся вблизи ее поверхности плазмой.

Эти эффекты наблюдались при облучении мишеней-конвертеров сильноточным релятивистским электронным пучком микросекундной длительности ускорителя Темп-А, работающего в ННЦ ХФТИ [9]. Ускоритель имеет следующие параметры: ток – 1...5 кА; энергия электронов до 0,5 МэВ; длительность импульса – 2...5 мкс; плотность мощности до $5 \cdot 10^{12}$ Вт/м². Пучок формируется в магнитоизолированном диоде микросекундной длительности за счет взрывной эмиссии. Транспортировка пучка к мишени осуществляется ведущим магнитным полем ~1 Тл.

Под действием сильноточного РЭП происходит плавление мишени толщиной 50 мкм из тантала (Рис.5,а) и разрыв мишени из вольфрама толщиной 200 мкм (см. Рис.5,б). Заметим, что в камере взаимодействия ускорителя, где происходит облучение мишеней, в условиях вакуума понижена теплоотдача с облученной поверхности во внешнюю среду.

Наибольшую долговечность и стабильность при работе показали мишени из молибдена толщиной 500 мкм. На Рис. 5,в показана мишень из Мо, на которой происходит лишь поверхностная переплавка материала в течение 15 пусков ускорителя.

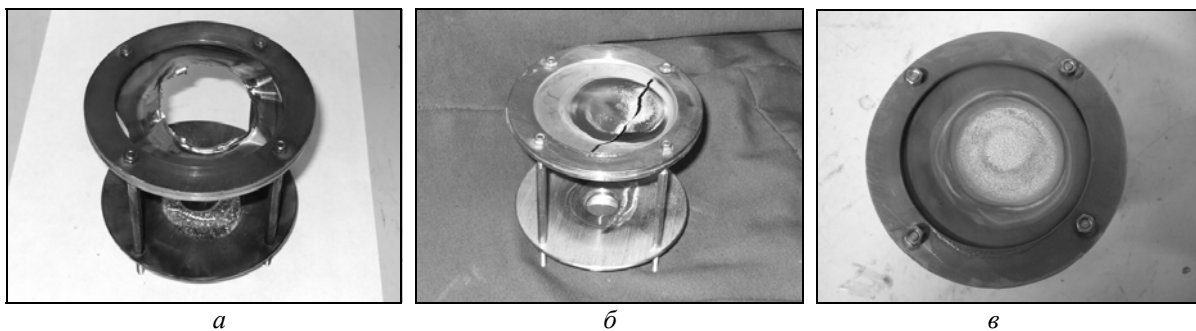


Рис.5. Разрушение мишеней под действием сильноточного РЭП

Однако интенсивность получаемого на этой мишени рентгеновского импульса в несколько раз меньше, чем можно было бы получать на тонких мишенях из тантала или вольфрама. Эта проблема может быть решена применением эффективного охлаждения используемых мишеней, которое позволило бы снизить или устранить тепловые эффекты, приводящие к повреждению мишеней.

В настоящее время наиболее эффективная система теплоотвода – это тепловая трубка и тепловой сифон. Изготовленные на основе тепловой трубы

конвертеры в процессе эксплуатации дали положительные результаты для молибдена и тантала, что позволило увеличить число пусков до прожигания фольги. Но для вольфрама по-прежнему наблюдается растрескивание поверхности при взаимодействии с импульсным сильноточным РЭП, хотя при квазистационарном нагреве в пламени газовой горелки был обеспечен высокий теплоотвод, о чем свидетельствует отсутствие цветов побежалости на поверхности (Рис.6).

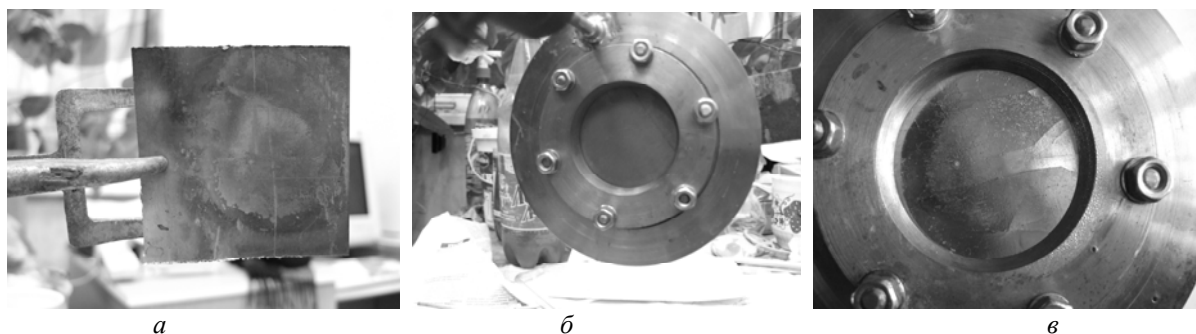


Рис.6. Состояние поверхности вольфрама: а – цвета побежалости на пластине после обжига на воздухе; б – поверхность пластины с теплоотводом после обжига; в – растрескивание пластины при взаимодействии с сильноточным РЭП

ЛИТЕРАТУРА

1. R.G. Vasil'kov, V.I. Gol'danski, V.V. Orlov. About of the electric nuclear breedings // *Uspekhi Phizicheskikh nauk*. 1983, v.139, p.217-220 (in Russian).
2. N.A. Khizhnyak. *Safe nuclear power*. Kharkov: NSC KhPTI, 2004, p.148 (in Russian).
3. ТУ 231 БССР 020-87.
4. С.А. Ковалёв. *Испарение и конденсация в тепловых трубах*. М.: «Наука», 1989, с.106-112.
5. Ю.Ф. Герасимов, Ю.Ф. Майданник и др. Низкотемпературные тепловые трубы с отдельными каналами для пара и жидкости // *ИФЖ*. 1975, т.26, №6, с.957-960.
6. М.Н. Шановский и др. *Физические основы тепловых труб*. М.: «Атомиздат», 1978.
7. Патент №40349, Украина. Посуд «Діма» для теплової обробки харчових продуктів / Г.А. Кривоносов, Д.С. Мельников // *Бюллетень №7*, 2009.
8. G.A. Krivonosov, I.N. Onishchenko, V.I. Volkov. Modified evaporating thermosiphon // *Proc. of the VIth Minsk Int. Sem. "Heat Pipes, Heat Pumps, Refrigerators"*. Minsk, Belarus, 2005, p.198-201 (in Russian).
9. В.Т. Уваров, Ю.В. Ткач, Н.П. Гадецкий и др. *Получение сильноточных пучков микросекундной длительности с высоким КПД*. Препринт ХФТИ 84-30. М.: «ЦНИИАтоминформ», 1984, с.13.

Статья поступила в редакцию 02.06.2010 г.

APPLICATION OF HEAT PIPES IN ACCELERATOR TECHNOLOGY

Yu. G. Zalesky, G. A. Krivonosov, I. N. Onishchenko, A. G. Ponomaryev

Heat exchanger, based on a principle of the thermal pipes (TP) and installed in high current ion gun of the charged particles accelerator, are tested. Due to compactness and autonomy of the developed design it was succeeded in working without a boiler under applied potential 100 kV. The total removed power makes 0.6 kW. At that the temperature of elements of the device that is being cooled does not exceed 60°C. Another investigated application of TP in accelerator technique was cooling the target, which was used as a convertor for X-ray producing using high current beams of pulsed power electron accelerators. In such performance the convertors in operation process gave positive results for Mo and Ta.

ЗАСТОСУВАННЯ ТЕПЛОВИХ ТРУБ У ПРИСКОРЮВАЛЬНОЇ ТЕХНІКИ

Ю.Г. Залеський, Г.О. Кривоносов, І.М. Оніщенко, О.Г. Пономарьов

Проведено пробні випробування теплообмінника, що працює на принципі теплових труб (ТТ), встановленого на сильноточову іонну гармату прискорювача заряджених часток. Завдяки компактності і автономності розробленої конструкції вдалося обійтися без бойлера, що знаходиться під потенціалом 100 кВ. Сумарна потужність, що відводиться, складає 0.6 кВт. Температура елементів охолоджуваного пристрою при цьому не перевищує 60°C. Інше досліджуване застосування ТТ у прискорювальній техніці є охолодження мішеней, що використовуються як конвертери для генерації рентгеновського випромінювання з використанням сильноточових пучків потужних імпульсних прискорювачів. У такому виконанні конвертери в процесі експлуатації дали позитивні результати для Мо і Та.