

К. т. н. А. Н. ГЕРШУНИ, к. т. н. А. П. НИЩИК

Украина, НТУУ “Киевский политехнический институт”
E-mail: politekhins@gmail.com

Дата поступления в редакцию
23.07 2010 г.

Оппонент д. т. н. Ю. Е. НИКОЛАЕНКО
(МПП, г. Киев)

СИСТЕМА ОХЛАЖДЕНИЯ ИСПАРИТЕЛЬНО-КОНДЕНСАЦИОННОГО ТИПА ДЛЯ РЕНТГЕНОВСКИХ ТРУБОК

Исследованы свойства системы охлаждения, которая является высокоэффективным теплопроводом и одновременно обеспечивает электрическую изоляцию между источником и стоком теплоты, при ее различной ориентации в пространстве.

При работе рентгеновской трубки большая часть подводимой к ней энергии выделяется в виде теплоты, вследствие чего происходит нежелательный разогрев фокусного и околофокусного пространства анода, что приводит к эрозии поверхности вольфрамовой пластинки-зеркала. Перегрев анода ускоряет “старение” (разрыхление) поверхности зеркала, а также ухудшает вакуум в трубке, что приводит к интенсивному распылению и даже подплавлению зеркала и меди анода под зеркалом, а это влияет на интенсивность рентгеновского излучения, которая может понизиться до 1/3 от нормального значения. Уровень надежности трубки, достижение стабильной мощности и обеспечение длительного ресурса определяются выбором эффективной системы охлаждения, которая должна иметь простую, надежную и экономичную конструкцию.

В рентгеновском приборостроении охлаждение тепловыделяющих элементов осуществляется, в основном, за счет конвекции воздуха или жидкости. Низкая эффективность радиаторного воздушного охлаждения обусловлена невозможностью существенного увеличения поверхности радиатора и высоким термическим сопротивлением теплопровода, соединяющего тепловыделяющий элемент с радиатором. К тому же, такие системы охлаждения характеризуются большой массой и габаритами.

Значительно более эффективно жидкостное охлаждение, но оно недостаточно надежно: на практике встречаются случаи разгерметизации системы в результате появления неплотностей и сужения каналов для протока жидкости вследствие отложения загрязнений.

Широко распространенный способ охлаждения рентгеновского излучателя естественной конвекцией жидкого диэлектрика (трансформаторного масла) [1], когда теплота передается потоком теплоносителя к холодной плите, также не лишен существенных недостатков, ограничивающих его применение: невы-

сокий уровень интенсивности теплопередачи, значительный перегрев масла при продолжительной работе, приводящий к его разложению и снижению электрической прочности, сложность устройства из-за необходимости учитывать расширение масла при нагреве и, соответственно, невысокий уровень надежности.

Сравнительный анализ существующих способов охлаждения показывает, что применение систем охлаждения испарительно-конденсационного типа, выполненных на основе тепловых труб (ТТ) или двухфазных термосифонов и обладающих не только обычными для них свойствами, но и специальными — диэлектрическими, позволит увеличить мощность рентгеновских трубок, перейти на непрерывный режим их работы, повысить надежность [2]. В таких системах возможно использование твердых компаундов вместо трансформаторного масла, что снизит массу и габариты рентгеновского излучателя.

Целью настоящей работы являлось изучение зависимости основных характеристик разработанной системы охлаждения испарительно-конденсационного типа на основе диэлектрических тепловых труб (ДТТ) от различной ее ориентации в гравитационном поле.

Конструкция диэлектрической тепловой трубы

Диэлектрическая тепловая труба для охлаждения рентгеновских трубок должна одновременно выполнять две основные функции: служить эффективным теплопроводом, соединяющим пространственно разделенные источник теплоты (анод) и сток теплоты (холодную плиту) и электрически изолировать корпус прибора от высокого электрического потенциала анода.

Первая функция присуща устройствам, построенным по испарительно-конденсационному принципу. Оптимальным решением для выполнения второй функции является создание диэлектрической развязки в транспортной зоне ТТ. Другие возможные решения (размещение слоя диэлектрического материала между зоной испарения металлической ТТ и анодом и/или между зоной конденсации и холодной плитой; последовательное соединение через диэлектрические слои нескольких ТТ; выполнение из диэлектрических материалов всех элементов ТТ) являются либо неосуществимыми, либо низкоэффективными. Конструктивные элементы зон теплообмена ТТ (т. е. зон испарения и конденсации) целесообразно выполнять металлическими, что позволит сохранить высокую теп-

ловую эффективность металлических тепловых труб, а конструктивные элементы транспортной зоны — из диэлектрических материалов. Это, совместно с использованием теплоносителя с диэлектрическими свойствами как в жидком, так и в парообразном состоянии, обеспечит необходимую электрическую прочность. Такая система охлаждения будет работоспособной при условиях надежного (с достаточной механической прочностью) и герметичного соединения составляющих элементов системы, надежной гидравлической связи прилегающих участков капиллярной структуры, совместимости разнородных материалов с теплоносителем. Важным является также обеспечение небольших массы и габаритов системы охлаждения. Анализ возможных конструктивных решений ДТТ позволил выбрать оптимальный вариант, при котором участки корпуса соединяются неразъемно, а жидкостной и паровой каналы размещаются в разных корпусах.

Материал корпуса ДТТ должен удовлетворять не только общим требованиям к материалам корпусов ТТ, но и дополнительным требованиям, а именно:

- материал корпуса транспортной зоны должен быть неполярным диэлектриком с необходимым уровнем электрической прочности;

- диэлектрический и металлический материалы корпуса должны иметь достаточно близкие температурные коэффициенты линейного расширения в диапазоне рабочих температур;

- свойства материалов должны соответствовать режимным параметрам отдельных операций технологического процесса изготовления и сборки деталей ДТТ (например, температура плавления каждого материала должна быть выше рабочей температуры отдельных стадий технологического процесса пайки диэлектрических и металлических участков корпуса).

В качестве диэлектрических материалов могут быть использованы стекло, кварц, различные виды керамики, а в качестве металлических — медь, нержавеющая сталь, никель и т. д. Диэлектрическая капиллярная структура (КС) ДТТ должна обладать высокими капиллярно-транспортными характеристиками, а уровень ее эффективной теплопроводности (теплопроводности насыщенной теплоносителем КС) не является существенным. Исходный материал для диэлектрической КС должен быть неполярным диэлектриком с соответствующим уровнем диэлектрической прочности. В качестве исходных материалов для изготовления диэлектрической КС могут быть использованы кварц, стекло, оксиды в виде порошка или волокон.

Теплоноситель ДТТ также должен быть неполярным диэлектриком с соответствующим уровнем электрической прочности как в жидком, так и в парообразном состоянии, должен быть совместим с материалами ДТТ и иметь высокий уровень чистоты для обеспечения требуемой электрической прочности. Все указанные требования существенно уменьшают возможности выбора теплоносителя, в качестве которого в низкотемпературном диапазоне могут использоваться лишь некоторые диэлектрические теплоносители, применяемые в радиоэлектронике [3], а имен-

но: фреоны Ф-11, Ф-113, жидкости ДЭФ, МД-3Ф и некоторые другие.

Разработанная с учетом вышеперечисленных требований система охлаждения рентгеновского излучателя [2, с. 184] представлена на **рис. 1**.

Система охлаждения представляет собой две разъемносоединяемые ДТТ специальной конструкции, каждая из которых должна обеспечивать передачу половины теплового потока, выделяемого анодом рентгеновской трубки. Каждая ДТТ сконструирована по принципу диэлектрической развязки в транспортной зоне, при этом металлические и керамические детали каждой половины системы охлаждения соединены неразъемно с помощью пайки, а для жидкостного и парового потоков предусмотрены отдельные корпуса. В качестве теплоносителя в данной системе используется фреон Ф-113. Выбор теплоносителя обусловлен тем, что по сравнению с жидкостями ДЭФ и МД-3Ф фреоны значительно превосходят их по величине характеристических параметров $N = \sigma r / \nu_{ж}$ и $\sigma / \rho_{ж}$, где σ — коэффициент поверхностного натяжения; r — скрытая теплота парообразова-

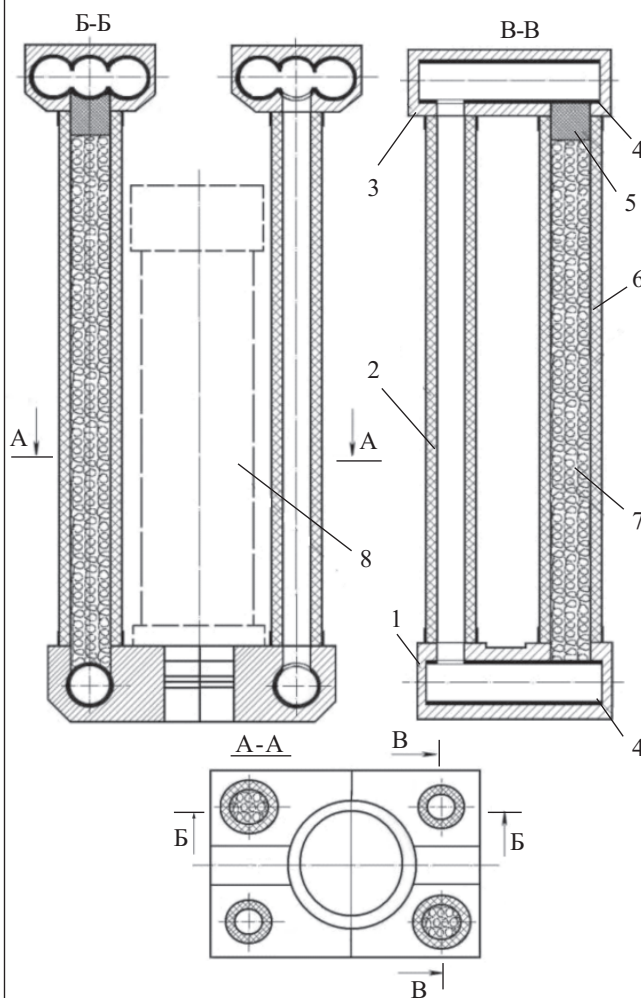


Рис. 1. Система охлаждения рентгеновской трубки: 1 — испаритель; 2 — паровая труба; 3 — конденсатор; 4 — медноволокнистая капиллярная структура; 5 — медноволокнистый цилиндр; 6 — жидкостная труба; 7 — диэлектрическая капиллярная структура; 8 — рентгеновская трубка

ния; $\nu_{\text{ж}}$ — кинематическая вязкость жидкости; $\rho_{\text{ж}}$ — плотность жидкости.

Эти параметры являются основными критериями эффективности теплоносителей для тепловых труб. Кроме того, вследствие особенностей кривой упругости паров Ф-113 в заданном диапазоне рабочей температуры давление внутри ДТТ невелико (на уровне атмосферного), что облегчает обеспечение механической прочности конструкции. Важно также то, что по электрической прочности жидкая фаза Ф-113 близка к паровой.

Диэлектрические участки корпуса, выполненные из алюмооксидной радиотехнической керамики, представляют собой цилиндрические трубы длиной 170 мм с диаметром 19 мм и толщиной стенки 3,5 мм (для жидкостного потока) и диаметром 15 мм и толщиной стенки 3,0 мм (для парового потока).

Диэлектрическая капиллярная структура представляет собой войлок из отрезков кварцевой нити длиной 3 мм. Металлические детали корпуса выполнены из бескислородной меди, а соединительные винты — из латуни. Металлическая КС — медноволокнистая.

Каждая ДТТ включает в себя (см. рис. 1) металлические испаритель 1 и конденсатор 3, а также диэлектрическую транспортную зону, состоящую из паровой трубы 2 и жидкостной трубы 6. Диэлектрическая капиллярная структура 7 полностью по всему сечению и высоте заполняет внутренний объем трубы 6. Медноволокнистая капиллярная структура 4 в канале испарителя 1 имеет толщину 1,5 мм и пористость 0,68, а в канале конденсатора 3 имеет толщину 1,3 мм и пористость 0,8. Гидравлическая связь между диэлектрической КС 7 и медноволокнистой структурой 4 в канале конденсатора 3 осуществляется с помощью медноволокнистого цилиндра 5 пористостью 0,8. Медноволокнистые капиллярные струк-

туры 4 соединены со стенками испарителя и конденсатора, а цилиндр 5 — с КС 4 конденсатора методом диффузионной сварки в защитной атмосфере.

Соединение системы охлаждения с рентгеновской трубкой 8 осуществляется путем охвата анода трубки сопрягаемыми поверхностями испарителя 1 с использованием слоя высокотеплопроводной смазки для уменьшения термического сопротивления контакта. При помощи стягивающих винтов обеспечивается плотный контакт сопрягаемых поверхностей испарителя и анода рентгеновской трубки. Внешняя горизонтальная поверхность конденсатора является теплоотдающей и сопрягается с поверхностью холодной плиты через слой теплопроводной пасты.

Система охлаждения работает по принципу замкнутого испарительно-конденсационного цикла. Тепловой поток, выделяемый анодом рентгеновской трубки, воспринимается испарителем 1 (каждой половинной системы) и вызывает испарение (или кипение) теплоносителя в металлической капиллярной структуре 4 испарителя. Пар под действием градиента давления движется по каналу паровой трубы 2 в конденсатор 3, где конденсируется на поверхности металлической КС 4 конденсатора. Выделившаяся теплота конденсации переносится за счет теплопроводности через КС 4 и стенку конденсатора 3 к холодной плите. Конденсат под действием капиллярных сил возвращается к испарителю 1 по пористой системе, состоящей из гидравлически связанных капиллярных структур: медноволокнистой конденсатора, медноволокнистой цилиндра, диэлектрической, медноволокнистой испарителя.

Каждая из изготовленных ДТТ была испытана на электрическую прочность (без тепловой нагрузки) приложением постоянного электрического напряжения между испарителем (+) и конденсатором (–).

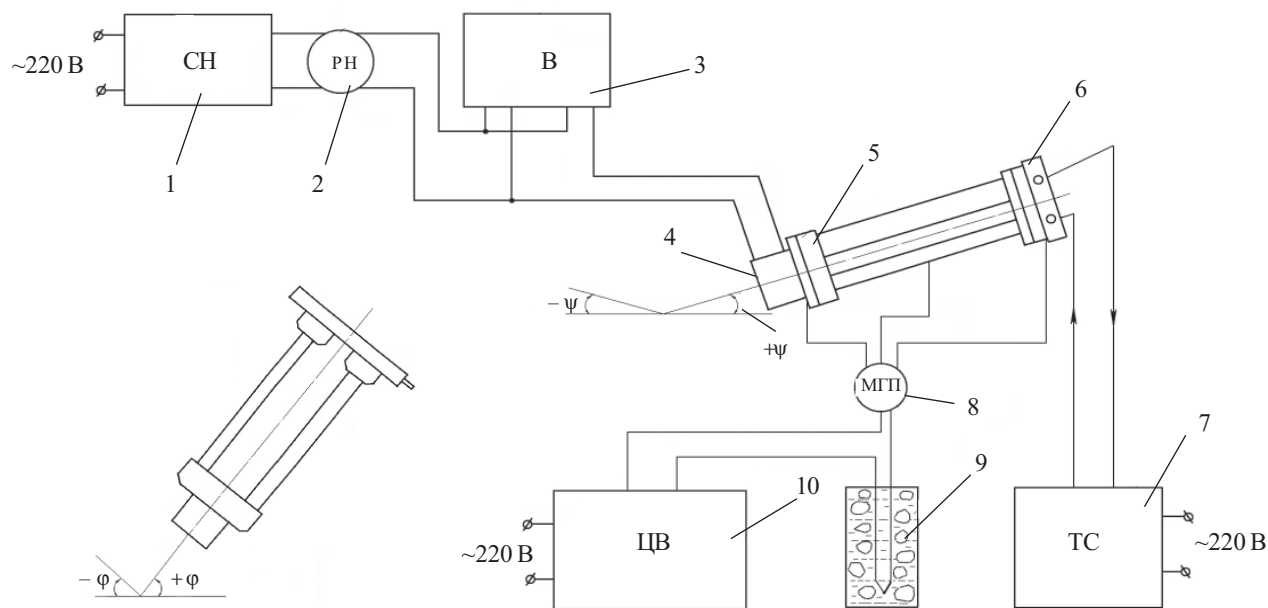


Рис. 2. Схема установки для испытания системы охлаждения:

1 — стабилизатор напряжения; 2 — регулятор напряжения; 3 — ваттметр; 4 — омический нагреватель на медном блоке; 5 — тепловые трубы; 6 — теплообменник; 7 — термостат; 8 — переключатель терморпар; 9 — сосуд со льдом; 10 — цифровой вольтметр

Испытания выявили достаточно высокую электрическую прочность разработанных ДТТ на уровне более 1 кВ/мм (по отношению к длине керамических труб).

Экспериментальная установка и методика проведения измерений

Принципиальная схема установки, на которой проводились испытания системы охлаждения, приведена на рис. 2. Тепловой поток подводился к тепловым трубам 5 с помощью омического нагревателя 4, установленного на медном блоке — имитаторе анода рентгеновской трубки. На участке поверхности медного блока, не сопрягаемом с поверхностью испарителей, равномерно намотана проволока из нихрома, изолированная от материала блока слоем слюды. Изменение подводимого теплового потока осуществлялось при помощи регулятора напряжения 2, подключенного к однофазной сети (220 В, 50 Гц) через стабилизатор напряжения 1, а его измерение — при помощи ваттметра 3. Термостат 7 поддерживал температуру охлаждающей воды на заданном уровне и обеспечивал ее циркуляцию через теплообменник 6, стенка которого, прижатая к конденсаторам тепловых труб при помощи стяжек (см. рис. 3), выполняла функцию холодной плиты. Температура нагревателя, тепловых труб и холодной плиты измерялась медь-константовыми термопарами (диаметр термоэлектродов 0,1 мм) с помощью переключателя 8 и цифрового

вольтметра 10. Холодные спаи термопар размещали в сосуде с тающим льдом 9.

Термопары (см. рис. 3) закреплялись с помощью свинца в пазах, выполненных на наружных поверхностях нагревателя (термопары № 1 и 2), испарителей (№ 5 и 6) и конденсаторов (№ 11 и 12), внутренних поверхностях испарителей тепловых труб (№ 3 и 4), холодной плиты (№ 13 и 14), а также закрепляли при помощи стеклоткани на наружной поверхности керамических труб: паровых (№ 7 и 8) и жидкостных (№ 9 и 10). Термопара № 7 (на рис. 3 ее не видно) располагалась на наружной поверхности паровой трубы ТТ1 аналогично термопаре № 8 на ТТ2.

Испытания проводились при горизонтальной ориентации системы охлаждения в пространстве ($\varphi=0^\circ$, $\psi=90^\circ$; $\varphi=90^\circ$, $\psi=0^\circ$) и при углах наклона $\varphi=\pm 60^\circ$, $\psi=90^\circ$; $\varphi=90^\circ$, $\psi=\pm 60^\circ$; $\varphi=\psi=90^\circ$ (φ — угол между плоскостью разреза испарителей, проходящей через продольную ось системы охлаждения (см. рис. 1) и горизонтальной плоскостью; ψ — угол между плоскостью, проходящей через продольную ось системы охлаждения перпендикулярно плоскости разреза испарителей, и горизонтальной плоскостью. Углы φ и ψ показаны на рис. 2).

Плотное соединение нагревателя 7 (см. рис. 3) с испарителями 1 и холодной плиты 8 с конденсаторами 4 обеспечивалось с помощью винтов, шпилек и стяжек 5. Для уменьшения термического сопротивления контактов нагревателя и холодной плиты с тепловыми трубами использовали теплопроводную пасту КТП-8. Наружные поверхности нагревателя и тепловых труб (в зонах нагрева и транспорта) изолировались от окружающей среды базальтовой изоляцией.

Перепад температуры по системе охлаждения ΔT_c определяли по разности средних значений температуры нагревателя и холодной плиты $\Delta t_{\text{нп}}$:

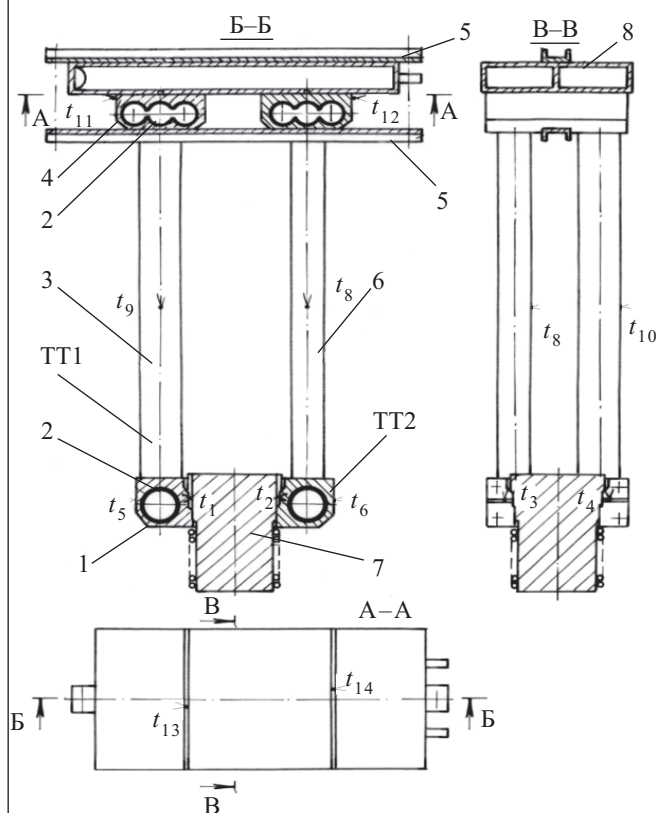


Рис. 3. Схема расположения термопар в системе охлаждения:

1 — испаритель; 2 — медноволкнистая капиллярная структура; 3 — жидкостная труба; 4 — конденсатор; 5 — стяжки; 6 — паровая труба; 7 — медный блок; 8 — теплообменник

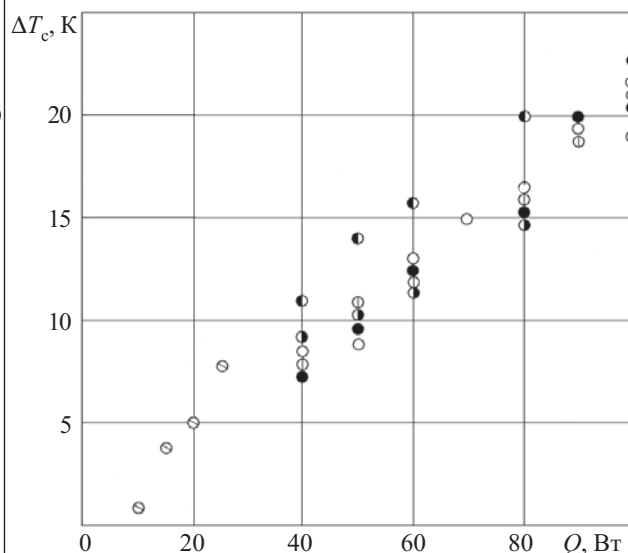


Рис. 4. Зависимость перепада температуры по системе охлаждения от передаваемого теплового потока при разной ориентации системы:

○ — $\varphi=0^\circ$, $\psi=90^\circ$ и $\varphi=90^\circ$, $\psi=0^\circ$; ◐ — $\varphi=60^\circ$, $\psi=90^\circ$; ◑ — $\varphi=90^\circ$, $\psi=60^\circ$; ● — $\varphi=60^\circ$, $\psi=90^\circ$; ◐ — $\varphi=90^\circ$, $\psi=60^\circ$; ◑ — $\varphi=90^\circ$, $\psi=60^\circ$

$$\Delta T_c = \Delta t_{\text{нп}} = \frac{t_1 + t_2}{2} - \frac{t_{13} + t_{14}}{2},$$

а термическое сопротивление теплопереноса от нагревателя к холодной плите определяли как отношение $\Delta t_{\text{нп}}$ к передаваемому тепловому потоку Q :

$$R = \frac{\Delta t_{\text{нп}}}{Q}.$$

Результаты исследования и их анализ

Основные результаты исследования приведены на рис. 4, где показана зависимость разности температуры (ΔT_c) между наружной поверхностью теплового имитатора анода рентгеновской трубки и поверхностью холодной плиты от передаваемого теплового потока. Опытные данные получены в таких режимах работы ДТТ, когда передаваемые тепловые потоки Q была ниже предельного значения.

Следует отметить, что при нагрузках на уровне 80—100 Вт большая часть температурного перепада (до 14 К) вызвана контактными термическими сопротивлениями: «имитатор анода рентгеновской трубки — испаритель ДТТ» и «конденсатор ДТТ — холодная плита», а разность температуры между зонами испарения и конденсации самих ДТТ составляет 2—3 К при 80 Вт и 6—8 К при 100 Вт.

Результаты экспериментов свидетельствуют о достаточно высокой эффективности теплообменных процессов в зонах испарения и конденсации, поверхности которых покрыты металловолоконистой капиллярной структурой. Термическое сопротивление системы охлаждения в исследованном диапазоне режимных параметров изменяется в пределах 0,12—0,25 К/Вт.

Как видно из рис 4, зависимость ΔT_c от Q для исследованной системы охлаждения характеризуется некоторой нелинейностью, выражающейся в уменьшении термического сопротивления с увеличением передаваемого теплового потока. Это вызвано тем, что для системы охлаждения, работающей в режиме кипения, коэффициент теплообмена в испарительных зонах ДТТ увеличивается при возрастании плотности теплового потока, а коэффициент теплообмена в зонах конденсации практически постоянен.

В связи с тем, что измерение температуры поверхностей, находящихся под высоким электрическим потенциалом, сопряжено с большими трудностями, проверка работоспособности системы охлаждения в условиях, близких к реальным, проводилась следующим образом.

Диэлектрические ТТ в сборе с тепловым имитатором помещали в емкость с трансформаторным маслом. Испарители и транспортные зоны закрывали теплоизоляцией так, что весь выделяемый тепловым имитатором тепловой поток отводился к трансформатор-

ному маслу от зон конденсации тепловых труб. Высокое напряжение (положительное относительно испарителей) подавалось на конденсаторы тепловых труб. В процессе эксперимента с помощью термопар измеряли температуру поверхностей теплового имитатора и испарителей ДТТ, а также температуру трансформаторного масла. Испытания проводились при вертикальной ориентации системы охлаждения в гравитационном поле ($\varphi=90^\circ$; $\psi=90^\circ$) для трех значений потенциала высокого напряжения: 50, 100 и 130 кВ. Уровень передаваемой мощности был постоянным и составлял 80 Вт.

В результате опытов установлено, что конструктивные параметры ДТТ обеспечивают электрическую прочность всей системы охлаждения при указанных значениях напряжения. При этом не было обнаружено заметного влияния высокого напряжения на основные теплотехнические характеристики системы охлаждения.

Для получения информации об изменении теплотехнических характеристик ДТТ при их длительной работе были проведены ресурсные испытания ДТТ в отсутствие электрического поля. Испытания проводились в течение 10000 часов. За этот период перепад температуры по длине тепловых труб остался неизменным, что свидетельствует о хорошей совместимости материалов конструкции ДТТ с теплоносителем.

Выполненные исследования подтверждают работоспособность и надежность в течение длительного времени разработанной системы охлаждения рентгеновского излучателя, сочетающей высокую эффективность процессов теплопередачи и электроизоляционные свойства при напряжениях на уровне 100 кВ.

Полученные результаты позволяют сделать вывод о возможности создания класса конструкций тепловых труб, сочетающих высокую эффективность теплопереноса и электроизоляционные свойства при напряжениях на уровне десятков и сотен киловольт.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Рентгенотехника. Кн. 1 / Под ред. В. В. Ключева.— М.: Машиностроение, 1992. [Rentgenotekhnika. Kn. 1 / Pod red. V. V. Klyueva. Moscow. Mashinostroenie. 1992]
2. Семена М. Г., Гершуни А. Н., Зарипов В. К. Тепловые трубы с металловолоконистыми капиллярными структурами.— К.: Вища школа, 1984. [Semena M. G., Gershuni A. N., Zaripov V. K. Teplovyte truby s metallovoloknistymi kapillyarnymi strukturami. Kiev. Vishcha shkola, 1984]
3. Туник А. Т. Охлаждение радиоэлектронной аппаратуры жидкими диэлектриками.— М.: Сов. радио, 1973. [Tunik A. T. Okhlazhdenie radioelektronnoy apparatury zhidkimi dielektrikami. Moscow. Sov. radio. 1973]