

УДК 621.039.02

ИСТОЧНИК ПАРА ЦЕЗИЯ НА ОСНОВЕ ГАЗОРЕГУЛИРУЕМОЙ ТЕПЛОВОЙ ТРУБЫ ДЛЯ АВТОНОМНЫХ ТЕРМОЭМИССИОННЫХ ЭГК

Боровских А.А., Иванов Ю.Н., Кайбышев В.З., Каландаришвили А.Г., Корюкин В.А.
(НИЦ «Курчатовский ин-т», г. Москва)

Одно- и многоэлементные электрогенерирующие каналы (ЭГК) предназначены для разных ядерных энергетических установок космического назначения, и их испытания проводятся в нашей стране в течение более 40 лет. За это время накоплен большой опыт работы и выявлены как общие черты таких сложных экспериментов, так и индивидуальные особенности, присущие различным конструкциям ЭГК [1—3].

ЭГК состоит из цилиндрического эмиттера с ядерным топливом и коллектора, разделенных межэлектродным зазором, в который подают пары цезия для эффективного преобразования тепловой энергии распада ядерного топлива в электроэнергию. В большинстве случаев в качестве генератора пара цезия используют термостаты с жидкометаллическим цезием. Однако наиболее перспективным представляется источник пара цезия на основе газорегулируемой тепловой трубы [4]. До сих пор не разработан генератор пара цезия для ЭГК, удовлетворяющий следующим требованиям:

стабильная подача и поддержание на постоянном уровне требуемого (оптимального) давления пара цезия, подаваемого в межэлектродный зазор в течение всего ресурса термоэмиссионного электрогенерирующего канала;

возможность непрерывной очистки межэлектродного пространства от остаточных газов и газообразных продуктов деления топлива, попадающих в межэлектродный зазор.

Первый опыт использования газорегулируемой тепловой трубы в качестве генератора пара цезия для термоэмиссионного ЭГК был положительный [5].

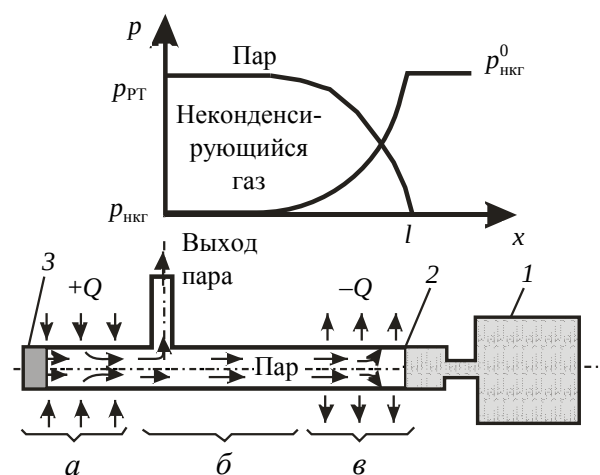
В настоящей статье приводятся результаты исследования работоспособности генератора пара цезия на основе газорегулируемой тепловой трубы. Такие системы подачи пара цезия могут быть использованы для создания автономных термоэмиссионных ЭГК, что позволит значительно повысить надежность всей термоэмиссионной ядерной энергетической установки.

Существенное влияние на работоспособность ЭГК оказывает газовый состав в межэлектродном пространстве преобразователя. Рассмотрение с этой точки зрения газорегулируемой тепловой трубы как источника пара цезия показывает, что одновременно со стабильной подачей проводится непрерывная диффузионная очистка межэлектродного пространства от неконденсирующихся газов по аналогии с действием пароструйного насоса. Анализ откачивающего действия источника пара цезия на основе газорегулируемой тепловой трубы проводился согласно схеме, приведенной на рис. 1.

Минимальное парциальное давление неконденсирующегося газа ($p_{\text{нкг}}^{\infty}$) на входе в пароотводящее устройство источника пара цезия на основе газорегулируемой тепловой трубы определяется соотношением

$$p_{\text{нкг}}^{\infty} = p_1 \exp\left(-v \frac{l}{D}\right), \quad (1)$$

где p_1 — парциальное давление откачиваемого газа в резервуаре с неконденсирующимся газом; v — средняя скорость струи пара; l — длина пути откачивания; D — коэффициент диффузии откачиваемого газа в паре. При заданном значе-



Р и с. 1. Схема расчета откачивающей способности газорегулируемого источника цезия: а, б, в — зона испарения, адиабатическая и конденсации соответственно; 1 — газовый резервуар; 2 — граница раздела пара цезия и газа; 3 — жидкий цезий

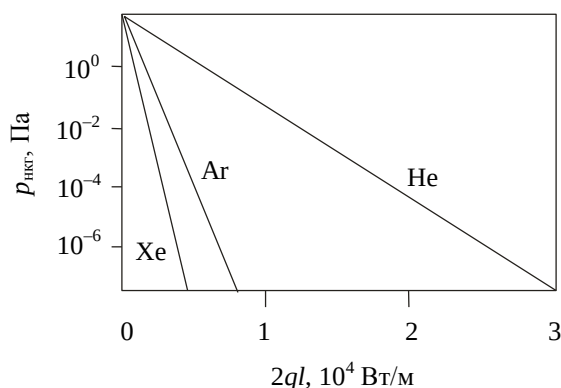
нии p_1 величина $p_{\text{нкг}}^{\infty}$ тем меньше, чем больше скорость пара v , длиннее путь откачивания l и меньше коэффициент диффузии газа в паре D . Определяя среднюю скорость пара в трубе как $v = qRT/Lp_{\text{п}}$ ($p_{\text{п}}$ — давление пара цезия), выражение для минимального давления неконденсируемого газа приводим к виду

$$p_{\text{нкг}}^{\infty} = p_1 \exp \times \left(-0,71 \cdot 10^{16} \sqrt{\frac{M_{\text{г}} M_{\text{п}}}{M_{\text{г}} + M_{\text{п}}}} (d_{\text{г}} + d_{\text{п}})^2 \frac{R}{L\sqrt{T}} ql \right), \quad (2)$$

где $M_{\text{г}}$, $M_{\text{п}}$ — молекулярная масса; $d_{\text{г}}$, $d_{\text{п}}$ — диаметр частиц газа и пара соответственно; R — газовая постоянная; L — скрытая теплота испарения; T — температура пара; q — удельный тепловой поток. Видно, что показатель экспоненты распадается на сомножитель $\sqrt{M_{\text{г}} M_{\text{п}} / M_{\text{г}} + M_{\text{п}}} (d_{\text{г}} + d_{\text{п}})^2 R/L\sqrt{T}$, зависящий от рода наполнителя, и сомножитель ql , являющийся функцией конструкции источника пара цезия и режима его работы.

На рис. 2 приведены расчетные зависимости предельного давления инертного газа на входе в пароотводящее устройство источника от параметра ql для трех газов (He, Ar, Xe), используемых как неконденсирующиеся в тепловой трубе для $p_1^{\text{Cs}} = 133$ Па. Как видно, источник пара цезия на основе газорегулируемой трубы в случае использования инертного газа обеспечивает требуемый газовый состав в межэлектродном пространстве ЭГК при умеренном производстве удельного теплового потока на длину пути откачивания ql .

В НИЦ «Курчатовский институт» создана экспериментальная установка, разработана ба-



Р и с. 2. Зависимость предельного давления неконденсирующегося газа от параметра ql для различных газов ($p_{\text{нкг}}^0 = 66,5$ Па)

зовая конструкция и проведены экспериментальные исследования в целях усовершенствования и повышения надежности генератора пара рабочего тела на основе газорегулируемой тепловой трубы.

В целях обоснования основных технических требований при дальнейшей разработке источника пара цезия на основе газорегулируемой тепловой трубы применительно к петлевым каналам для испытания ЭГК разработан макет генератора пара на основе газорегулируемой тепловой трубы. Схематично совместную работу ЭГК и источника пара цезия можно представить следующим образом: пароотводящий патрубок адиабатической зоны газорегулируемой тепловой трубы соединяется с межэлектродным зазором ЭГК, что позволяет подавать пар цезия в автономный термоэмиссионный ЭГК.

Основной целью разработки являлось создание макета генератора, способного в различных режимах генерировать давление пара цезия 30—700 Па. При этом было необходимо:

показать откачную способность генератора при работе с инертным газом (аргоном);

исследовать зависимость давления пара цезия от давления неконденсирующегося газа, что устанавливается по показаниям температуры адиабатической зоны газорегулируемой тепловой трубы;

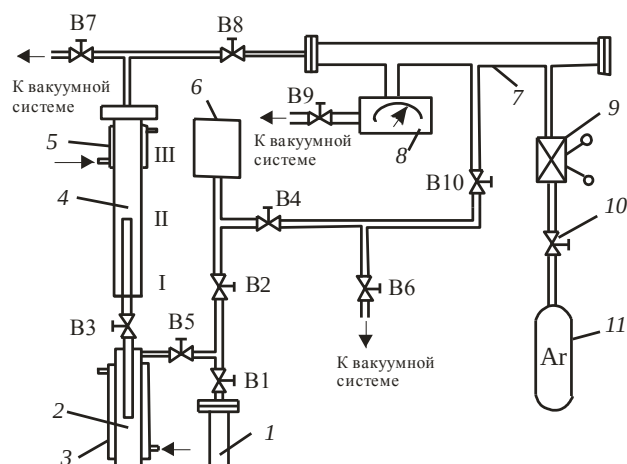
измерить температурное поле по длине газорегулируемой тепловой трубы.

На рис. 3 приведена схема подключения электровакуумного стенда к макету генератора пара цезия.

Генератор паров рабочего тела представляет собой трубу, изготовленную из коррозионно-стойкой стали диаметром 20, толщиной стенки 2, длиной 530 мм. Узел генератора содержит три различные температурные зоны: испарения, адиабатическую и конденсации длиной 70, 300 и 160 мм соответственно.

Экспериментальный стенд обеспечивает высоковакуумную (не хуже 10^{-5} Па) откачку рабочего объема, всей вакуумно-цезиевой системы и генератора пара цезия.

В начале эксперимента жидкий цезий в количестве 10 г перегоняли в объем газорегулируемой тепловой трубы из контейнера 1 через открытые вентили В1, В5, В3 и дистиллятор 2 в зону испарения I при закрытых вентиле В2, В4, В7, В8. По окончании перегонки цезия вентили

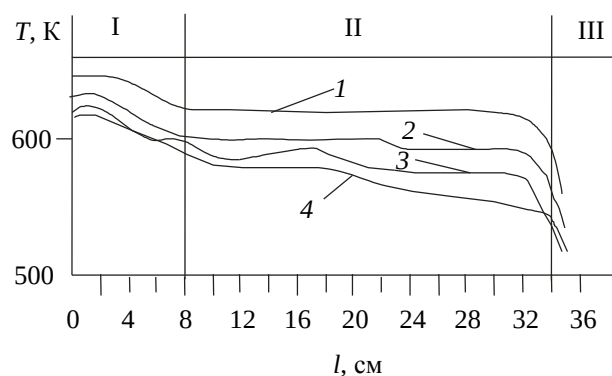


Р и с. 3. Принципиальная схема подключения блока генератора паров рабочего тела к электровакуумному стенду: 1 — контейнер с металлическим цезием; 2, 3 — дистиллятор цезия и рубашка охлаждения соответственно; 4, 5 — газорегулируемая тепловая труба и рубашка охлаждения соответственно; 6 — блок вакуумных датчиков; 7 — ресивер; 8 — дифференциальный манометр; 9 — газовый редуктор; 10, 11 — вентиль и газовый баллон соответственно; I, II, III — зона испарения, адиабатическая, конденсации соответственно

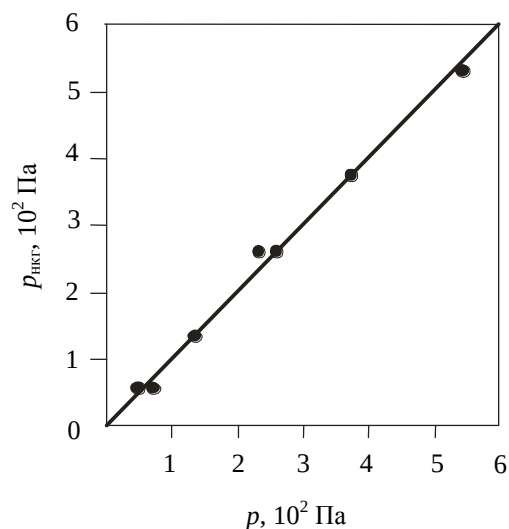
B1, B5, B3 закрывали. Аргон в объем генератора пара рабочего тела напускали из баллона 11 через вентиль 10, газовый редуктор 9 в ресивер 7, где с помощью дифференциального манометра 8 устанавливалось необходимое давление газа (30—700 Па) при закрытых вентилях B10, B8, B7. Через вентиль B8 аргон подавали в газорегулируемую тепловую трубу. Вдоль всей длины внешней поверхности газорегулируемой тепловой трубы через каждые 2 см размещали 25 хромель-алюмелевых термопар. Максимальная рабочая температура корпуса генератора паров рабочего тела 650—750 К обеспечивалась нагревателями сопротивления. Стенд содержал высоко- и низкотемпературные вентили, которые герметично перекрывали узлы установки. Были проведены дистилляция и пере конденсация цезия в зону испарения газорегулируемой тепловой трубы.

На рис. 4 представлены температурные характеристики газорегулируемой тепловой трубы при разном давлении неконденсирующегося газа (аргона) и зависимость давления пара цезия от давления аргона. На рис. 5 показана линейная зависимость между давлением пара цезия и аргона.

Откачивающую способность газорегулируемой тепловой трубы исследовали следующим образом. Остатки цезия захолаживали в



Р и с. 4. Распределение температурного поля вдоль источника пара цезия на основе газорегулируемой тепловой трубы при давлении аргона 370 (1), 266 (2), 133 (3), 80 Па (4); I, II, III — зона испарения, адиабатическая и конденсации соответственно



Р и с. 5. Зависимость давления пара цезия от давления неконденсирующегося газа аргона

дистилляторе 2. В рабочем для газорегулируемой тепловой трубы режиме открывали вентили B10, B4, B2, B5 при закрытом вентиле B6 и заполняли дистиллятор 2 газом до давления в ресивере. Затем закрывали вентили B10, B4, B5, повышали температуру дистиллятора до температуры газорегулируемой тепловой трубы и открывали вентиль B3. Вакуумный тракт и датчики давления откачивали при открытых вентилях B4, B2. Остатки цезия конденсировали в дистилляторе 2 при закрытом вентиле B3. Закрывали вентили B6, B4 и открывали вентиль B5. В дистилляторе 2 измеряли остаточное давление газа. Ухудшения вакуума при открывании вентиля B5 не наблюдалось.

Источники пара цезия для ЭГК на основе газорегулируемой тепловой трубы отличаются от других аналогичных систем следующими основными качествами:

непрерывная диффузионная очистка межэлектродного пространства ЭГК от неконденсирующихся примесей за счет односторонне направленного потока пара цезия;

возможность регулирования давления пара цезия за счет изменения давления неконденсирующегося газа в резервуаре газорегулируемой тепловой трубы, что обеспечивает безынерционное регулирование;

слабая зависимость от тепловой мощности, подаваемой в зону испарения, что значительно упрощает температурную стабилизацию рабочего режима преобразователя и упрощает температурную привязку к петлевому каналу термоэмиссионного ЭГК;

пространственное разделение пара и неконденсирующегося газа, что исключает потери цезия. В этих условиях появляется возможность по температуре адиабатической зоны и давлению неконденсирующегося газа определить давление пара цезия в рабочем объеме термоэмиссионного преобразователя (см. рис. 5).

Источник пара цезия на основе газорегулируемых тепловых труб позволит значительно упростить управление и стабилизацию выходных электрических параметров ЭГК. Его при-

менение повысит ресурс термоэмиссионных электрогенерирующих каналов за счет непрерывной диффузионной откачки межэлектродного пространства преобразователя от различных остаточных газов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кухаркин Н.Е., Пономарев-Степной Н.Н., Усов В.А. Космическая ядерная энергетика (ядерные реакторы с термоэлектрическим и термоэмиссионным преобразованием — «Ромашка» и «Енисей»). Под ред. Н.Н. Пономарева-Степного. М.: ИздАт, 2008. 146 с.
2. Ponomarev-Stepnoi N.N., Nikolaev Yu.V., Kucherov R.Yu. e.a. Comparative analysis of concepts of single-cell and multi-cell TFE of thermionic NPS. — In: Proc. AIP Conf. Albuquerque, 1993, p. 1347—1353.
3. Пономарев-Степной Н.Н. Ядерная энергетика в космосе. — Атомная энергия, 1989, т. 66, вып. 6, с. 371—374.
4. Каландаришвили А.Г. Источники рабочего тела для термоэмиссионных преобразователей энергии. М.: Энергоатомиздат, 1993. 304 с.
5. Синявский В.В. Методы и средства экспериментальных исследований и реакторных испытаний термоэмиссионных электрогенерирующих сборок. М.: Энергоатомиздат, 2000. 380 с.

Поступила в Редакцию 22.03.11

УДК 621.039.576

ВЕРИФИКАЦИЯ МЕТОДИКИ РАСЧЕТА КРИЗИСА ТЕПЛООТДАЧИ КОДА RELAP5/mod3.2 НА ОСНОВЕ ЭКСПЕРИМЕНТОВ НА СТЕНДЕ КС

Афремов Д.А., Яшиников Д.А. (ОАО «НИКИЭТ», г. Москва)

Применительно к РБМК-1000 проведена верификация методики расчета кризиса теплоотдачи кода RELAP5/mod3.2. Модели, установленные на стенде КС (НИЦ «Курчатовский институт») и использованные для изучения кризиса в условиях РБМК в 1969—1974 гг., наиболее близки по своим характеристикам к натурным [1]. Для верификации использовали 290 экспериментальных точек, полученных на пяти участках.

Для расчета критического теплового потока в коде RELAP5/mod3.2 используется метод [2], который состоит в интерполяции критического теплового потока в пространстве трех переменных: давление, массовый расход и относительная энтальпия потока. Интерполяция осуществляется по таблице с экспериментальными дан-

ными для труб, приведенными к диаметру 8 мм. Таблица создана на основе 15 тыс. экспериментальных точек и представляет собой трехмерный массив из 4410 точек, 15 значений давления — 0,1—20 МПа, 14 значений массового расхода — 0—7500 кг/(м²·с) и 21 значения относительной энтальпии потока — -0,5—1. После интерполяции значение критического теплового потока умножается на поправочные коэффициенты, учитывающие влияние следующих факторов: диаметр трубы, отличие критического теплового потока для пучков стержней от критического теплового потока для труб, аксиальный профиль энерговыделения, изменение пограничного слоя на входе в пучок и за дистанционирующими решетками.