

УДК 621.362:629.78.06

Источник пара цезия на основе тепловой трубы для петлевых термоэмиссионных сборок

БЫСТРОВ П. И., КИРИЕНКО В. П., ПОПОВ А. Н., СИНЯВСКИЙ В. В.

При испытаниях термоэмиссионных сборок межэлектродные зазоры преобразователей чаще всего обеспечиваются паром цезия с помощью термостата [1]. В этом случае для исключения выноса паров цезия в вакуумные тракты система сборки — термостат отсекается специальным клапаном от вакуумной системы. Однако для удаления десорбирующихся газов и появляющихся в процессе работы газообразных осколков деления приходится периодически открывать клапан, при этом или допускается вынос паров цезия в вакуумные тракты, или во время открытия клапана температура термостата должна быть снижена с соответствующим изменением режима испытаний сборок. Кроме того, многократные циклы открытия — закрытия клапана могут привести к потере его герметичности, а появившиеся микротечи — к дополнительному выходу и конденсации пара цезия в вакуумных трактах. Возникает поэтому необходимость создания цезиевой системы, допускающей одновременно с подачей пара цезия непрерывное удаление газов из межэлектродных зазоров преобразователей без выноса цезия и нарушения режима испытаний термоэмиссионных сборок.

В качестве такой системы может быть предложен источник пара цезия с фитильной системой возврата жидкого цезия, в котором использован принцип работы тепловой трубы (рис. 1). В тепловой трубе парогенератора, на внутренней поверхности которой закреплен металловолоконистый фитиль, можно выделить три зоны:

расположенную в нижней части зону испарения, которую нагревает наружный электронагреватель. Если расположить парогенератор вблизи активной зоны, можно обеспечить требуемую температуру за счет радиационного нагрева конструкции и создания соответствующих условий теплоотвода. В зоне испарения есть трубка с отверстием для отбора пара цезия в термоэмиссионный преобразователь (ТЭП) и термопары для определения температуры парового потока;

расположенную сверху зону конденсации, охлаждаемую снаружи водой реактора. Для интенсификации процесса конденсации пара цезия внутри этой зоны располагаются диафрагмы с отверстиями в шахматном порядке. Верхняя часть зоны конденсации соединяется с вакуумной системой;

расположенную между этими зонами переходную зону, отделенную от зоны испарения дроссельной шайбой с отверстием.

Рассматриваемый источник не является системой с расходом цезия; жидкий цезий по фитилю возвращается в зону испарения, а газы удаляются в систему вакуумирования. Потери цезия будут определяться температурой пара на выходе из зоны конденсации и при реально достигаемой в охлаждаемых петлевых каналах температуре будут пренебрежимо малы.

Для проверки работоспособности и исследования характеристик были разработаны и испытаны четыре модификации парогенератора, различающиеся размерами зон, структурой фитиля, размерами отверстий и расположением диафрагм. Испытания проводили на специальном термовакуумном стенде. Предварительное вакуумирование полости парогенератора (до вскрытия ампулы с цезием) проводилось при рабочей температуре в течение 20 ч до достижения вакуума 10^{-7} мм рт. ст. (1 мм рт. ст. = 133,322 Па). Уровень жидкого цезия в ампулах, парогенераторе и датчике давления пара регистрировали с помощью рентгеновской установки РУП-200-5. В процессе испытаний изменяли расположение электронагревателей по высоте парогенератора.

Записав баланс сил давления для замкнутого парожидкостного контура, можно получить следующее уравнение циркуляции теплоносителя в тепловой трубе:

$$\Delta p_{\text{п}} + \Delta p_{\text{ж}} + h\rho = 2\sigma \cos \theta / r_{\text{и}} - 2\sigma \cos \theta / r_{\text{к}}, \quad (1)$$

где σ и ρ — коэффициент поверхностного натяжения и плотность жидкого цезия соответственно; θ — краевой угол смачивания конструкционного материала цезием; h — высота подъемного жидкого цезия в фитиле; $\Delta p_{\text{п}}$ и $\Delta p_{\text{ж}}$ — падение давления по паровой и жидкой фазам теплоносителя. Теплофизические свойства цезия и гидродинамические

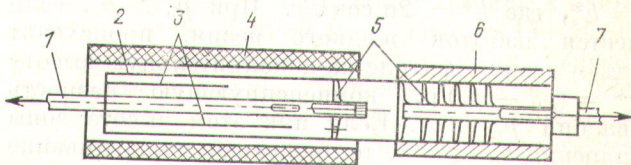
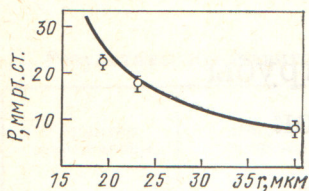


Рис. 1. Конструкционная схема парогенератора на основе тепловой трубы: 1 — трубка для подачи пара цезия в межэлектродные зазоры ТЭП; 2 — тепловая труба с металловолоконистым фитилем; 3 — термопара для измерения температуры пара; 4 — электронагреватель зоны испарения; 5 — дроссельные диафрагмы; 6 — холодильник зоны конденсации; 7 — газовакуумная магистраль



Р и с. 2. Зависимость предельно допустимого давления паров цезия в зоне испарения от радиуса капилляра

характеристики металловолоконистого фитиля определяли из работ [2—4]. С учетом того что в рабочих условиях абсолютные значения давления пара в зонах испарения и конденсации сильно различаются ($p_{и} \gg p_{к}$), а расход теплоносителя мал ($\Delta p_{ж} \ll \Delta p_{и}$), можно считать, что капиллярная структура должна преодолевать практически полное давление пара в зоне испарения. Тогда максимальное значение радиуса капилляра в зоне испарения определяется выражением

$$r_{и} \leq 2\sigma \cos \theta / p_{\max} \quad (2)$$

где p_{\max} — максимальное рабочее значение давления пара цезия.

Наиболее нагруженным мениском в капиллярной структуре является мениск, расположенный в верхней части зоны испарения (непосредственно перед первой диафрагмой), так как в этом сечении давление жидкого цезия меньше, чем в нижней части зоны испарения. В случае невыполнения условия (1) пар, находящийся в зоне испарения, вытесняет жидкую фазу из фитиля и уменьшает сечение для прохода жидкого цезия, в результате чего наступает «срыв», т.е. осушение фитиля в зоне испарения с последующим перегревом стенок. При исследовании парогенераторов с разной капиллярной структурой подтвердилась зависимость предельно допустимого давления p_{\max} от радиуса капилляра r . Результаты опытов хорошо согласуются с теоретической зависимостью $p_{\max} = f(r)$, приведенной на рис. 2. Предельное давление, полученное до появления «срывных» явлений, составило 23 мм рт. ст.

Высота подъема жидкого цезия в фитиле зависит от свойств капиллярной структуры. При $p_{и} \approx p_{к}$ (момент заполнения и пропитки жидким цезием фитиля) высота подъема цезия составляет $h = h^*$, где $h^* = 2\sigma \cos \theta / r$. При $p_{и} > p_{к}$, если имеется избыток жидкого цезия, происходит подъем цезия в фитиле на дополнительную высоту $h^{**} = (p_{и} - p_{к}) / \rho$, компенсирующую разность давлений $p_{и} - p_{к}$. Если при этом высота зоны испарения $h_{и} < h^{**}$, то происходит выдавливание (перелив) жидкого цезия из зоны испарения в зону конденсации или переходную зону тепловой трубы. С помощью рентгенограмм было установлено, что при переливе жидкий цезий собирался в переходной зоне над первой диафрагмой. Отметим, что при снижении давления в зоне испарения до значения $(p_{и} - p_{к}) < \rho h^{**}$ жидкий цезий сливался

в нижнюю часть зоны испарения и восстанавливался свободный уровень.

При испытании парогенераторов с небольшой высотой зоны испарения обнаружено, что в момент исчезновения свободного уровня цезия наблюдался перегрев нижней части зоны испарения. Это, по-видимому, объясняется вскипанием цезия в фитиле вследствие резкого понижения давления при исчезновении свободного уровня от $p_{и}$ до $p_{и} - 2\sigma \cos \theta / r_{и}$. Так как в рабочих условиях «срыв» тепловой трубы может привести к отказу работы ТЭП, подобные явления недопустимы. Поэтому минимальная высота зоны испарения должна быть выше h^{**} .

На работу источника пара цезия оказывают влияние месторасположение первой диафрагмы и размеры отверстий в ней. При увеличении диаметра отверстий, а следовательно, и расхода циркулирующего цезия увеличивается градиент давления пара вдоль зоны испарения. Поэтому размер отверстий должен быть минимальный, но достаточный для вакуумирования сборки и удаления газообразных продуктов деления в процессе работы. В петлевых каналах, описанных в работе [1], для удаления газообразных осколков деления достаточно двух отверстий диаметром 0,5 мм. Однако пропускная способность таких отверстий при предварительном вакуумировании недостаточна. С учетом этих противоречивых требований в первой диафрагме были сделаны два отверстия диаметром 1 мм, пропускная способность этой диафрагмы $\sim 60 \text{ см}^3/\text{с}$ (всего генератора $\sim 30 \text{ см}^3/\text{с}$), что почти на порядок выше пропускной способности межэлектродных зазоров термоэмиссионных сборок [1].

Месторасположение первой диафрагмы оказывает влияние на предельное давление пара цезия, развиваемое генератором, и на градиент температур по длине зоны испарения. Для исключения передавливания избытка жидкого цезия из зоны испарения в переходную зону при $p \approx 20$ мм рт. ст. необходимо, чтобы расстояние от поверхности жидкого цезия до первой диафрагмы было не менее 150 мм. Эксперименты показали, что для надежной работы парогенератора первая диафрагма должна быть размещена в зоне нагрева. В противном случае влияние низкой температуры конденсатора распространяется на верхнюю часть зоны испарения, что приводит к ее неизотермичности. При этом распределение температуры пара по длине зоны испарения представляет собой типичный низкотемпературный режим тепловой трубы. В этом случае затруднено определение давления пара цезия, отбираемого в зазоры ТЭП. Для исключения градиента температур в зоне испарения необходимо, чтобы высота нагревателя была больше высоты зоны испарения и первая диафрагма была ниже верхнего торца нагревателя примерно на 10 мм. Кроме того, желательно,

чтобы переходная зона, где нет подвода и отвода тепла, составляла 20—30 мм. Тогда длина зоны конденсации может быть 70—90 мм.

Температурное поле вдоль парогенератора характеризуется изотермичностью в зоне испарения, резким перепадом от рабочей температуры до температуры, которая несколько выше температуры охлаждающей воды в переходной зоне конденсации. С помощью датчика пара цезия установлено, что при изотермичной зоне испарения давление пара цезия, подаваемого в ТЭП, достаточно надежно определяется показаниями термопар, установленных в паровом канале в месте отбора пара. Показания всех остальных термопар, включая термопары, расположенные на донышке и стенке трубы, а также значения температуры пара ниже отверстия, не определяют давление пара и могут превышать показания контрольной термопары на 15—30 °С. Отметим, что подобные явления могут наблюдаться и в обычных термостатах, нагреваемых снаружи, в результате чего реальное давление пара цезия будет ниже, чем определяемое температурой стенки.

Для проверки возможного выноса пара цезия в вакуумную систему были проведены ресурсные испытания парогенератора при рабочей температуре. После испытаний не обнаружены следы цезия в вакуумном тракте и азотной ловушке. В целом отмечена надежная работа источника пара цезия на основе тепловой трубы с металловолоконистым фитилем до давления пара ~20 мм рт. ст. Предполагается при петлевых испытаниях термомиссионных сборок, аналогичных описанным в работе [1], экспериментально проверить работу такого генератора пара цезия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бержатый В. И. и др. «Атомная энергия», 1971, т. 31, вып. 6, с. 585.
2. Шпильрайн Э. Э. и др. Теплофизические свойства щелочных металлов. М., Изд-во стандартов, 1970.
3. Смирнов А. А. Измерение работы адгезии щелочных металлов. Канд. дис. М., МИФИ, 1971.
4. Семена М. Г. и др. «Теплофизика высоких температур», 1975, т. 13, вып. 1, с. 162.

Поступила в Редакцию 11.12.79

УДК 621.039.51.15:621.039.572.22:621.039.526

Оценка погрешностей расчета коэффициентов критичности и воспроизводства энергетических быстрых реакторов из-за неточности нейтронных данных

АЛЕКСЕЕВ П. Н., МАЙТУРОВ Г. Н., НИКОЛАЕВ М. Н.

В работах советских и зарубежных авторов [1—13] оценке точности расчетных предсказаний коэффициентов критичности ($k_{эф}$) и воспроизводства (КВ) для энергетических быстрых реакторов уделяется большое внимание. Установлено, что основной причиной неопределенности результатов расчетных предсказаний этих (и других) физических характеристик быстрых реакторов-размножителей являются погрешности используемых в расчетах нейтронных сечений. Вклады других источников погрешностей (приближенность расчетных методик, технологические допуски изготовления деталей реактора) оказываются существенно меньшими.

Требуемая точность расчетных предсказаний $k_{эф}$ и КВ быстрых реакторов-размножителей была обоснована в работе [1] и подтверждена более поздними оценками [3]. Эти оценки исходят из допустимой погрешности в расчете критической массы ~1,5% и в T_2 ~10% и составляют 0,5% для $k_{эф}$ и 1,5% для КВ (в работе [1] указываются примерно вдвое большие допустимые погрешности, но там имеется в виду 90%-ный уровень достоверности, а не 67%-ный, как в настоящей работе). Точность расчетов, гарантируемая достиг-

нутой к настоящему времени точностью знания нейтронных данных, значительно хуже: по оценкам работ [2—12] она составляет ~3—5% для $k_{эф}$ и ~6—8% для КВ. На основе этих оценок были разработаны программы повышения точности нейтронных данных в микроскопических и макроскопических экспериментах [3—7].

Следует отметить, что предыдущие оценки достигнутого уровня точности относились примерно к 1970 г., и расхождения оценок точности расчетных предсказаний связаны прежде всего с различием оценок неопределенностей исходных групповых сечений. Спектр чувствительности $k_{эф}$ и КВ к различным типам нейтронных сечений в настоящей работе и, например, в работах [4—6], как показывает сравнение, одинаков. Таким образом, изменения в оценках точности расчетных предсказаний $k_{эф}$ и КВ быстрого реактора-размножителя обусловлены учетом обширной информации, полученной за последнее десятилетие в дифференциальных нейтронно-физических экспериментах. К тому же предыдущие значения достигнутой точности нейтронных сечений имеют во многих случаях качественный характер и базируются на приближенных оценках точности сечений по неко-