

УДК 621.039

Электродный узел для источника полиэнергетического атомарного потока

В. И. Волосов, Е. П. Семенов, А. Г. Стешов, И. Н. Чуркин

Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, г. Новосибирск, Россия

В стадии разработки в ИЯФ СО РАН находится стационарный источник полиэнергетического атомарного потока для модификации поверхности конструкционных материалов. При стационарном режиме работы источника существует проблема снятия тепловой мощности с элементов конструкции. Возникающие при неравномерном нагреве температурные градиенты вызывают значительные механические напряжения в электродах и элементах их крепления. В статье описана конструкция электродного узла для стационарного режима работы и представлены результаты моделирования теплового и напряженно-деформированного состояния электродов.

Ранее был проведен цикл исследований источника со скрещенными полями (ИСП) как источника интенсивного полиэнергетического атомарного потока для модификации поверхностей, а также как источника плазменного потока для установки по разделению изотопов методом ИЦР-нагрева [1]—[4]. Исследования проводились в импульсном режиме работы ИСП (длительность горения разряда до 0,2 с), были получены следующие параметры полиэнергетического атомарного потока: средняя энергия атомов (диапазон масс 12—184 а.е.) ~ 1 кэВ, плотность потока на выходе из источника до 50 экв·мА/см².

В настоящее время разрабатывается стационарный источник полиэнергетического атомарного потока. Это будет аналогичная ИСП-аксиально-симметричная система со стержневым электродом (катодом) на оси (диаметр 20 мм) и цилиндрической вакуумной камерой с анодом (диаметр 400 мм), в которой горит S-разряд в скрещенных радиальном электрическом и аксиальном магнитном полях.

Одним из основных узлов стационарной установки является электродный узел, который должен вводить необходимые потенциалы в плазму, снимать значительную часть тепловой мощности, выделяющейся в источнике, и защищать изоляторы, на которых крепятся электроды от плазмы. Предполагается, что в стационарном режиме параметры S-разряда не будут отличаться от параметров разряда в ИСП: полное напряжение ~ 3 кВ, максимальный ток разряда ~ 100 А, соответственно суммарная тепловая нагрузка на стенки камеры, электродные узлы и катод порядка 300 кВт. При больших значениях разрядного тока распределение тепловой нагрузки по элементам конструкции источника может быть таким, что на каждый электродный узел может приходиться до 85 кВт.

Конструкция электродного узла для стационарного источника

Стационарный источник полиэнергетического атомарного потока схематически изображен на рис. 1.

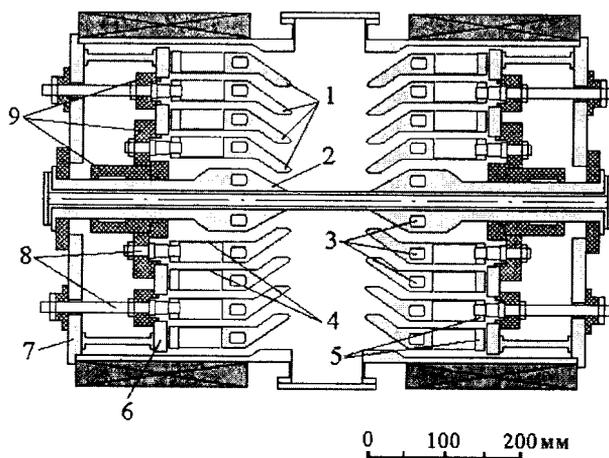


Рис. 1. Источник полиэнергетического атомарного потока: 1 — электроды; 2 — центральный электрод; 3 — каналы охлаждения; 4 — цилиндрические обечайки; 5 — поддерживающие кольца; 6 — монтажная плита; 7 — вакуумная камера; 8 — цилиндрические опоры; 9 — изоляторы

Электродный узел стационарного источника представляет собой систему из четырех соосных конусных медных электродов и центрального электрода. Электроды через специальные каналы охлаждаются водой.

Работа в стационарном режиме с большими тепловыми потоками требует уменьшить число электродов и увеличить их радиальный размер (толщину) для увеличения теплоотвода. Расстояние по радиусу между соседними электродами Δ в электродном узле должно быть меньше характерного ларморовского радиуса иона R_l [5]. При четырех электродах выполняется это условие: $R_l \gg \Delta$ для иона средней массы ($T_i = 48$ а.е., $R_l \sim 10$ см).

Конфигурация электрических и магнитных полей в источнике, а также широкий диапазон рабочих давлений (10^{-5} — 10^{-1} Торр) создают благоприятные условия для возникновения электрического пробоя по “Пашену” и пенинговских разрядов в электродном узле.

Наиболее вероятно возникновение пробоя по “Пашену” вдоль силовых линий магнитного поля в зазорах между поддерживающими кольцами

электродов и "заземленной" монтажной плитой, а также между металлическими элементами крепления электродов на монтажной плите и вакуумной камерой. При зазоре 4 мм между поддерживающими кольцами электродов и монтажной плитой, рабочие величины "Pd" находятся вне опасной области [6]. Для предотвращения пробоя между металлическими элементами крепления электродов и вакуумной камерой используются специальные экраны, позволяющие уменьшить зазор в опасных местах и "сместиться" в область более высоких напряжений пробоя по кривой Пашена.

Наиболее опасными для образования пеннинговских разрядов местами являются радиальные межэлектродные зазоры. Выбранное радиальное расстояние между соседними электродами (10 мм) препятствует развитию подобных разрядов, ограничивая плотность плазмы в ячейке Пеннинга.

Конусная форма носиков электродов необходима для защиты изоляторов, на которых крепятся электроды, от аксиальных потоков излучения и электронов из объема плазмы. Угол наклона конусной поверхности электродов 30 град был выбран с учетом распределения термомеханических нагрузок и из конструктивно-технологических соображений.

Температура носиков электродов значительно выше, чем температура в районе канала охлаждения, и возникающий температурный градиент приводит к возникновению механических нагрузок в местах крепления, деформации и смещению электродов. Поэтому каждый электрод закреплен на тонкой (2 мм) медной цилиндрической обечайке, которая присоединена к поддерживающему кольцу. Обечайка играет роль механической развязки между электродом и поддерживающим кольцом. Поддерживающее кольцо на четырех цилиндрических опорах через специальные изоляторы крепится к монтажной плите электродного узла.

Тепловое и напряженно-деформированное состояние электродов

На электродный узел приходит до 85 кВт тепловой нагрузки (соответственно, средняя плотность теплового потока 700 кВт/м^2). 70 % тепла передается ионами, остальное — излучением, электронами и нейтралами. Тепловая нагрузка неравномерно распределяется по поверхности каждого электрода.

Оценки показывают, что при большом токе разряда (~100 А) происходит интенсивное упругое рассеяние ионов, что приводит к появлению у них продольной (вдоль магнитного поля) скорости, и часть ионов попадает на электродные узлы. Для рассматриваемой конструкции узла в виде вложенных соосных конусных поверхностей (см. рис. 1) поверхность электрода с мень-

шим радиусом частично экранируется электродом большего радиуса, находящимся над ним, и основная тепловая нагрузка, переносимая ионами, приходится на носовую часть электрода.

Излучение, электроны и нейтральные частицы равномерно падают на всю поверхность электрода, "смотрящую" на плазму. Промоделировать такую тепловую нагрузку можно, разбив поверхность каждого электрода на четыре участка с разными плотностями приходящего теплового потока (рис. 2 и табл. 1).

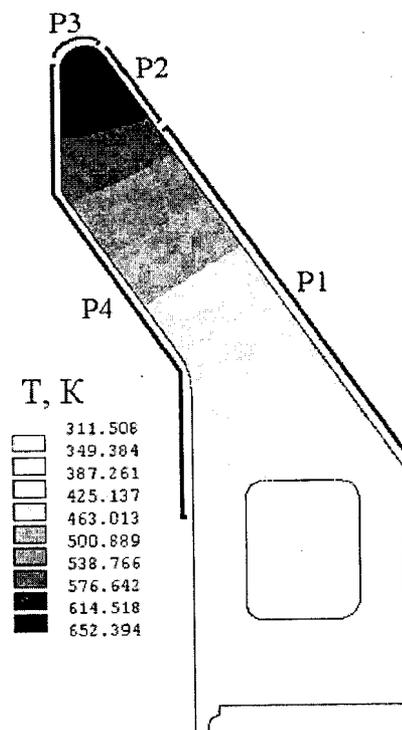


Рис. 2. Распределение температуры в 3-м электроде

Таблица 1

№	U_1 , кВт/м ²	U_2 , кВт/м ²	U_3 , кВт/м ²	U_4 , кВт/м ²
2	108,4	1275,4	2223,2	21
3	108,4	1151,5	2006,9	21
4	108,4	1106	1927,8	21
5	108,4	1082,2	1886,5	21

Расчет теплового и напряженно-деформированного состояния был проведен для конструкции, состоящей из электрода, обечайки и поддерживающего кольца. Последнее считалось жестко зафиксированным, так как механическая жесткость цилиндрических опор много выше жесткости кольца и обечайки, и, таким образом, задача была сведена к аксиально-симметричной. Считалось, что конструкция целиком сделана из меди, без швов и соединений. При расчете механических напряжений учитывалось давление воды в канале охлаждения (4 атм). Использовались при моделировании термомеханические свойства меди: зависимости модуля упругости E , предела текучести σ_T и коэффициента линейного упрочнения E_T от температуры — приведены в табл. 2 [7].

Таблица 2

t, K	308	373	473	573	673
$E \cdot 10^9, Pa$	96,6	94,2	91,8	87,3	81,6
$\sigma_T \cdot 10^6, Pa$	34,5	31,05	27,6	23,45	20
$E_T \cdot 10^9, Pa$	1,31	1,14	0,97	0,81	0,65

Расчет проводился с помощью программного пакета ANSYS методом конечных элементов (двухмерные 8-узловые элементы, треугольная нерегулярная сетка, модель содержала 13 354 элемента). Первоначально определялось распределение температурных полей в электроде, а затем механические напряжения и деформации в электроде, вызванные градиентом температур.

Температурное поле в электроде стабилизируется через 80 с ($3\tau_{heat}$) после начала нагрева. На рис. 2 приведено распределение температуры в электроде при стационарном нагреве.

Максимальная температура на носике электрода 652 К. Наблюдается значительный градиент температуры вдоль электрода, разница температур между носиком электрода и местом присоединения обечайки ~340 К. Максимальное значение температуры на границе канала охлаждения равно 349 К (ниже температуры кипения воды).

Градиент температур приводит к возникновению значительных механических напряжений и деформаций в теле электрода. Деформации обечайки и самого электрода приводят к радиальным (рис. 3) и аксиальным смещениям электрода.

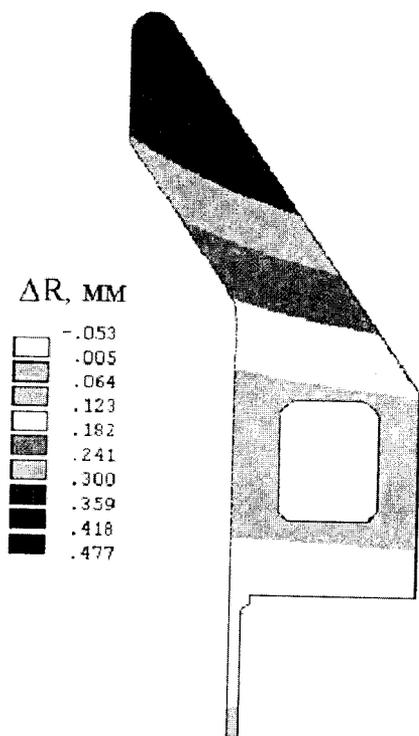


Рис. 3. Смещение 3-го электрода по радиусу

Максимальные смещения испытывают носики электрода: носик 3-го электрода смещается по радиусу на 0,48 мм, а 5-го — на 0,75 мм. Это приводит к повороту 3-го электрода на угол 0,25°, а 5-го — на угол 0,56°. Эти смещения при-

водят к отклонению профиля электрического поля от заданного линейного профиля. Суммарное отклонение профиля электрического поля от заданного линейного профиля вызвано смещением электродов при нагреве и точностью выставке электродов относительно оси источника (± 1 мм) и не превышает 10 %.

На рис. 4, а приведено распределение интенсивности механических напряжений в 3-м электроде по Мизесу $\sigma_i = \sqrt{1/2((\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2)}$.

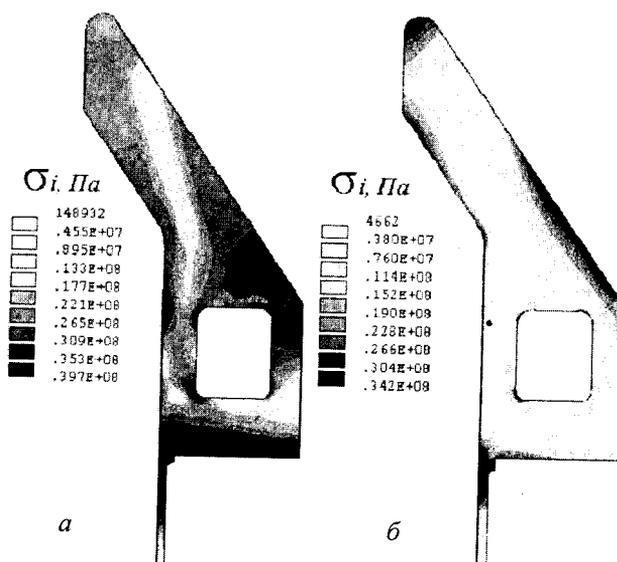


Рис. 4. Распределение интенсивности механических напряжений в 3-м электроде в нагретом (а) и в остывшем (б) состоянии

Максимальное значение интенсивности напряжений σ_{imax} превышает предел текучести σ_T , что свидетельствует об образовании пластических деформаций и, соответственно, остаточных деформаций и напряжений. В основном материал электрода находится в области упругих деформаций, а в области пластических деформаций находится место соединения обечайки с электродом и небольшие участки в носовой части электрода. Максимальные значения интенсивности механических напряжений не превышают предела прочности материала (200 МПа). Наиболее критичной является область присоединения обечайки к электроду. Интенсивность механических напряжений в этой области в момент нагрева ~ 40 МПа при $\sigma_T = 34,5$ МПа для этой температуры, однако интенсивность относительных деформаций в этой области невелика (0,0074) и не приводит к разрушению обечайки (рис. 5).

Зона канала охлаждения электрода находится в области упругих деформаций, и угроза разрушения канала охлаждения отсутствует.

Реальный электрод не является цельной конструкцией, в нем имеются паяные соединения (вблизи канала охлаждения и в цилиндрической обечайке). Оценка прочности этих соединений, сделанная из предположения, что разрушающие

касательные напряжения не ниже половины от предела текучести для материала припоя, показала, что угрозы разрушения этих соединений нет.

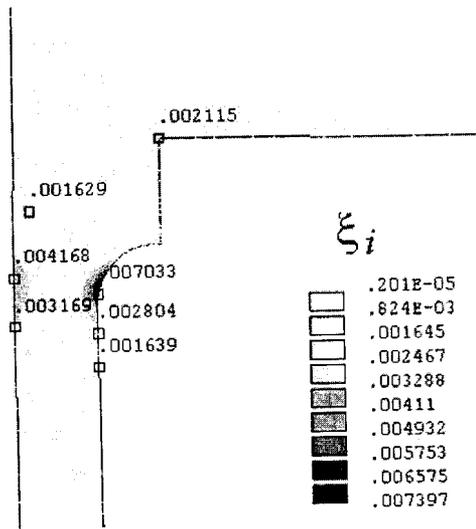


Рис. 5. Относительные деформации в месте соединения обечайки и электрода в нагретом состоянии

При выключении источника полное остывание электрода до начальной температуры происходит через $3\tau_{cool} = 300$ с. После остывания в электродах остаются значительные остаточные напряжения ($\sigma_{i\max} \sim 34$ МПа) и деформации (см. рис. 4, б). Они образуются в тех местах, где во время нагрева материал переходит в область пластических деформаций, особенно в месте соединения обечайки с электродом. Остаточные напряжения и деформации приводят к тому, что после остывания электрод остается смещенным относительно своего начального положения. После одного цикла нагрев—охлаждение смещения незначительны, носик электрода смещается по радиусу к оси источника на ~ 10 мкм, но при последующих включениях эти смещения накапливаются. Амплитуда смещения носика электрода в процессе нагрева—остывания остается практически неизменной и, следовательно, по-

сле каждого следующего цикла нагрев—остывание носик электрода приближается к оси.

С увеличением числа циклов включения—выключения при нагреве максимальные напряжения в обечайке уменьшаются, но при охлаждении — возрастают. Оценки, сделанные по результатам расчетов, показывают, что электродный узел выдержит без разрушения порядка 1000 циклов включения—выключения.

Заключение

Проведенное моделирование теплового и напряженно-деформированного состояний электрода показало, что разработанный электродный узел может работать в источнике полиэнергетического атомарного потока, выдерживая стационарную тепловую нагрузку до 85 кВт. Электродный узел аналогичной конструкции может быть использован для источника плазменного потока в установке по разделению изотопов методом ИЦР-нагрева [8].

Литература

1. Volosov V. I., Abdrashitov G. F., Bekhtenev A. A., Kubarev V. V., Pal'chikov V. E., Yudin Yu. N. // Journal of Nuclear Materials. 1984. № 128. P. 445—451.
2. Volosov V. I., Churkin I. N. // Surface and Coatings Technology. 1997. V. 96. P. 75—80.
3. Volosov V. I., Churkin I. N., Steshov A. G. // Review of Scientific Instruments. 1998. V. 69. № 2. P. 822—824.
4. Volosov V. I., Churkin I. N., Steshov A. G. // Ibid. P. 856—858.
5. Bekhtenev A. A., Volosov V. I., Pal'chikov V. E. // Nuclear Fusion. 1980. V. 20. № 5. P. 579—597.
6. Мик Дж., Крэгс Дж. Электрический пробой в газах. — М.: Изд-во иностранной литературы, 1960. С. 112.
7. Chin E., Reis E. E. // Proc. of the 16th IEEE/NPSS Symposium on Fusion Engineering, Champaign, Illinois (Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., Piscataway, 1996). V. 2. P. 1287.
8. Волосов В. И., Чуркин И. Н., Стешов А. Г., Демнев В. В. // Прикладная физика. 2002. № 5. С. 42—49.

Статья поступила в редакцию 20 апреля 2004 г.

An electrode assembly for the source of the polyenergetic atomic flux

V. I. Volosov, E. P. Semenov, A. G. Steshov, I. N. Churkin
Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS, Novosibirsk, Russia

The stationary source of the polyenergetic atomic flux for surface modification of the structural materials has been developing at the Budker INP SB RAS. In the stationary operational regime of the source, there is a problem of heat power removal from elements. Temperature gradients that arise at non-uniform heating cause significant mechanical stresses in the electrodes and their fastening elements. The design of the electrode assembly for the stationary operational regime is described in the article. Results of simulation of the heat and stress-and-deformation load to the electrodes are presented.

* * *