УДК: 621.791.72

С.Ю. Корнилов, И.В. Осипов, Н.Г. Ремпе

Электронный источник с плазменным эмиттером для работы в режиме термически нагруженной разрядной камеры

Представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований режимов работы источника электронов с плазменным эмиттером при наличии интенсивной тепловой нагрузки на элементы разрядной камеры. Показано, что наиболее уязвимым к воздействию температуры является постоянный магнит разрядной камеры. Описаны особенности конструирования электронных источников, эксплуатирующихся в условиях интенсивного воздействия тепловой нагрузки. Описано применение разработанного источника в технологии создания сверхпроводящих материалов по программе ИТЭР.

Ключевые слова: электронный источник с плазменным эмиттером, постоянный магнит, термическая нагрузка.

В электронных источниках с плазменным эмиттером величина магнитного поля существенно влияет на параметры создающего эмитирующую плазму разряда. Разряд зажигается и горит в относительно широком диапазоне индукции магнитного поля. Однако при значениях индукции ниже некоторого порогового значения происходит перестройка разряда, сопровождающаяся ростом напряжения горения, а также развитием неустойчивостей и нарушением условий его зажигания [1]. От величины и конфигурации магнитного поля отражательного разряда зависят не только параметры самого разряда, но и условия формирования и фокусировки пучка в электронно-оптической системе с плазменным эмиттером. Следовательно, крайне нежелательной является ситуация, при которой магнитное поле в процессе работы существенно снижается.

Магнитное поле в разрядной камере создается постоянным магнитом. В типичной конструкции разрядной камеры магнит расположен вблизи ее электродов, на которых при продолжительном горении разряда выделяется значительная по величине тепловая мощность. В условиях термически нагруженной разрядной камеры температура магнита может достигать значений, при которых магнит частично или полностью теряет магнитные свойства. Следовательно, на этапе проектирования источников с плазменным эмиттером одной из важных задач является изучение условий термостабилизации элементов разрядной камеры в критических режимах эксплуатации источников с плазменным эмиттером. Такие режимы могут возникать не только за счет разогрева электродов разрядной камеры в результате горения разряда, но и из-за воздействия внешнего источника тепла.

Цель настоящей работы заключалась в определении условий термостабилизации источника и разработке конструкции разрядной камеры, обеспечивающей постоянство магнитных свойств магнита в условиях большой тепловой нагрузки.

Условия термостабилизации разрядной камеры

Наиболее распространенной является система охлаждения, в которой тепло от электродов отводится через промежуточный теплоноситель – трансформаторное масло, которое одновременно обеспечивает высоковольтную изоляцию электродов от корпусных деталей. Чаще всего в таких конструкциях магнит расположен внутри практически не охлаждаемого анодного блока. Такое расположение дает определенные преимущества в обслуживании источников, однако при работе в предельных по мощности режимах более важной становится проблема охлаждения магнита.

Выполнены эксперименты с использованием типовой разрядной камеры технологического источника электронов с плазменным эмиттером [2–4]. Схема экспериментов представлена на рис. 1. Цель экспериментов – определить условия, при которых наступает термостабилизация.

Разрядная камера образована тремя электродами: полым катодом *5*, анодом *6*, эмиттерным электродом *11*. Электроды разделены металлокерамическими изоляторами *10*. Постоянный магнит *7* создает в разрядной камере магнитное поле с индукцией ~ 0,08–0,1 Тл. Температура электродов и масла измерялась ртутными термометрами *1–4, 8*. Тепловой контакт термометров с электродами камеры обеспечивался термопастой КПТ-8 *9*. Напряжение горения разряда в экспериментах оставалось практически неизменным и составляло около 360 В.

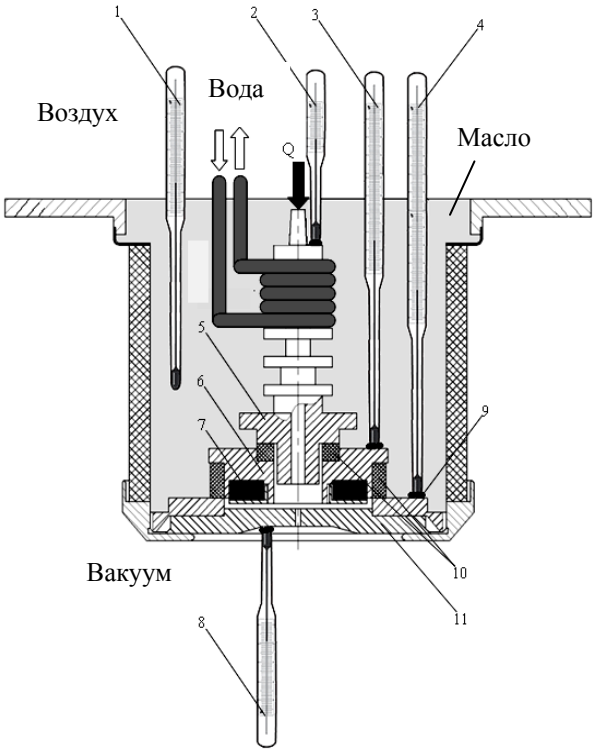

Рис. 1. Схема эксперимента: *1–4*, *8* – термометр; *5* – полый катод; *6* – анод; *7* – магнит; *9* – термопаста КПТ-8; *10* – металлокерамический изолятор; *11* – эмиттерный электрод

Измерения проводились в различных условиях: разрядная камера заполнена трансформаторным маслом, масло отсутствует, полый катод охлаждается проточной водой, охлаждение полого катода воздушное. Результаты измерений представлены на рис. 2, 3.

В первом эксперименте разрядная камера была заполнена трансформаторным маслом (см. рис. 1), полый катод дополнительно не охлаждался. Эти условия наиболее близки к тем, что реализуются в типовой конструкции источника. Показания термометров регистрировались при трех значениях разрядного тока – 100, 200 и 350 мА.

Представленные на рис. 2 зависимости имеют практически один и тот же угол наклона. В условиях, когда мощность, выделяющаяся на электродах, и скорость теплоотвода различны, это может быть объяснено эффективным теплообменом через масло.

Для проверки сделанного предположения был проведен эксперимент без трансформаторного масла. Отсутствие масла должно было свести к минимуму теплообмен между электродами разрядной камеры и, следовательно, привести к прямой зависимости скорости нагрева электродов от разрядного тока. Результаты измерений температуры при отсутствии масла в разрядной камере представлены на рис. 3.

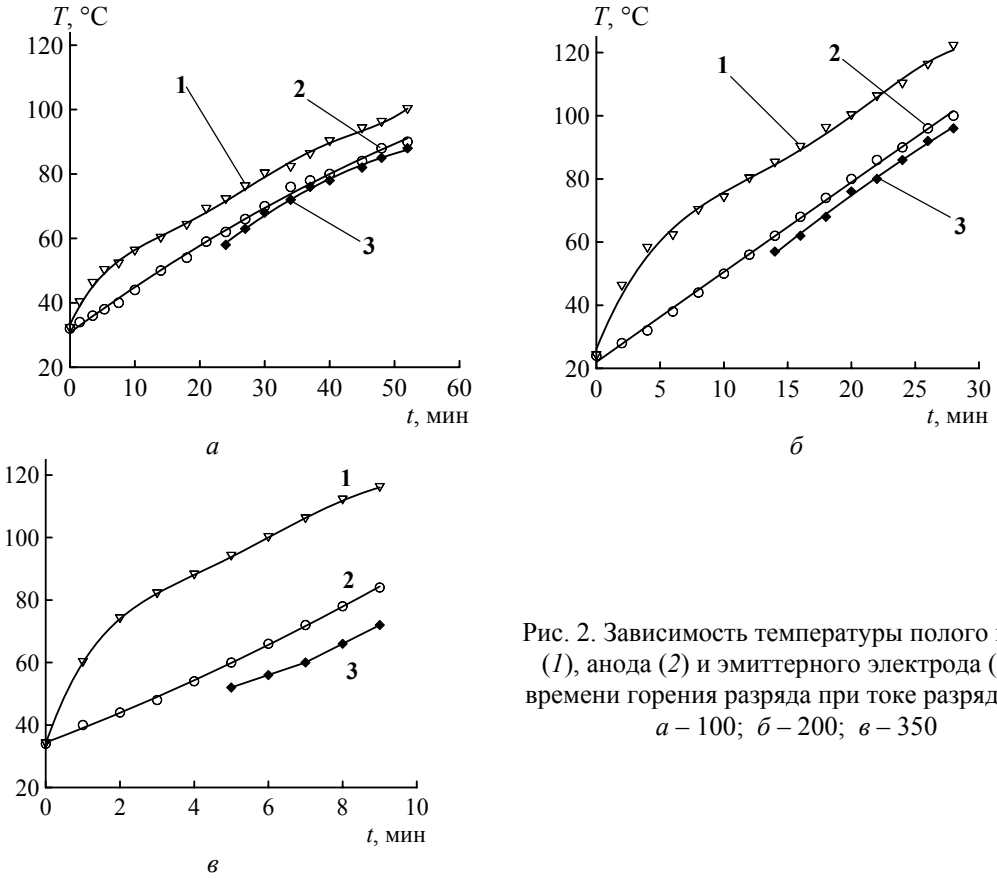

Рис. 2. Зависимость температуры полого катода (*1*), анода (*2*) и эмиттерного электрода (*3*) от времени горения разряда при токе разряда, мА: *а* – 100; *б* – 200; *в* – 350

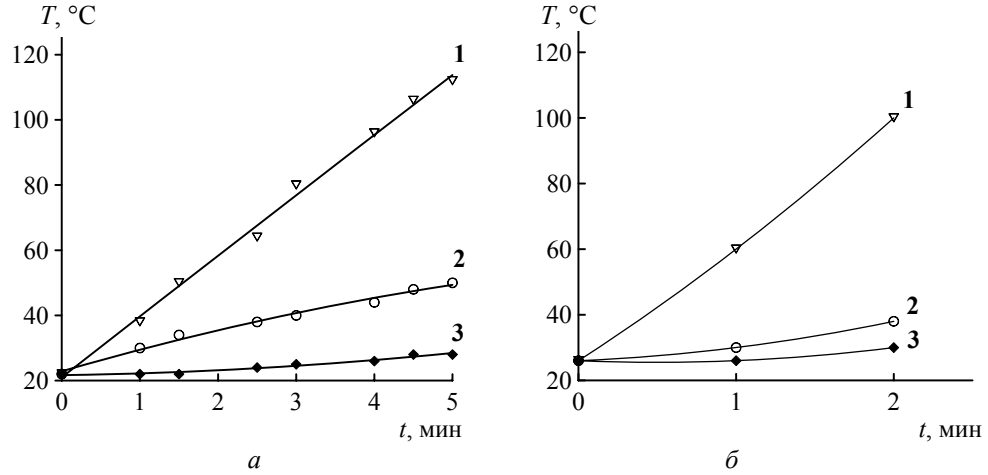

Рис. 3. Зависимость температуры полого катода (*1*), анода (*2*) и эмиттерного электрода (*3*) от времени горения разряда при токе разряда, мА: *а* – 100; *б* – 200

Полученные зависимости подтвердили сделанное предположение. Видно, что скорости изменения температуры электродов *dT/dt* при различных токах разряда различаются в несколько раз. Максимум тепловой мощности приходится на полый катод. Температура эмиттерного электрода оказывается меньше, чем температура анода. Возможно, это связано с тем, что термометр *4* (см. рис. 1) измеряет температуру не самого эмиттерного электрода, а конструктивного элемента, предназначенного для его крепления.

Цель следующего эксперимента – изучение характера нагрева электродов при длительной работе источника.

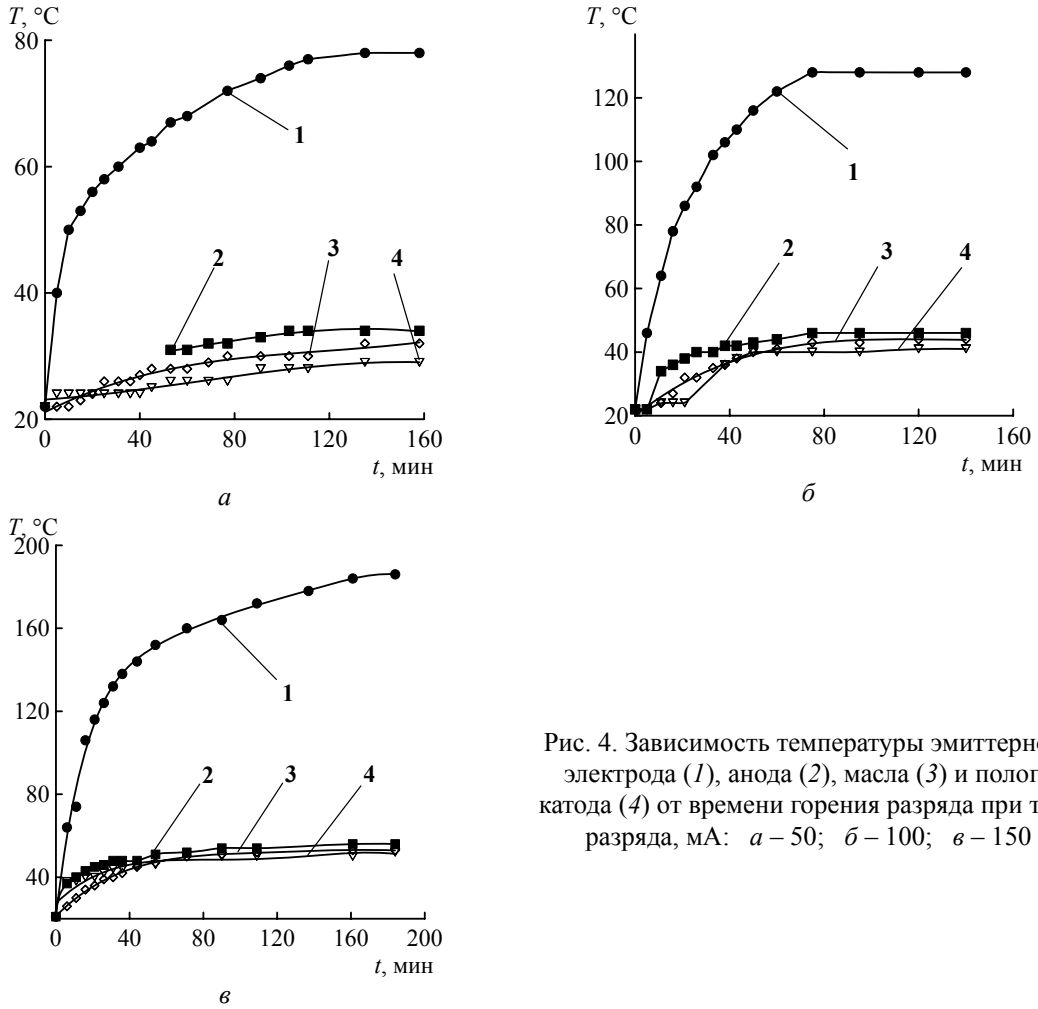

Рис. 4. Зависимость температуры эмиттерного электрода (*1*), анода (*2*), масла (*3*) и полого катода (*4*) от времени горения разряда при токе разряда, мА: *а* – 50; *б* – 100; *в* – 150

Продолжительность эксперимента определялась временем наступления процесса термостабилизации. Разрядная камера была заполнена трансформаторным маслом. Полый катод дополнительно охлаждался водой. Для измерения температуры непосредственно эмиттерного электрода был установлен термометр *8* (см. рис. 1).

Измерения выполнены при трех значениях тока разряда: 50, 100 и 150 мА. Эксперименты показали, что для электродов, находящихся в масле, термостабилизация наступает через 40–60 мин. Температуры электродов и масла близки, что, по-видимому, обусловлено эффективным теплообменом через него и слабо зависят от тока разряда. В то же время термостабилизация эмиттерного электрода даже при небольших токах разряда наступает лишь через два часа. Температура эмиттерного электрода более чувствительна к изменению разрядного тока. В установившемся режиме температура эмиттерного электрода в 2–5 раз превосходит температуру электродов в масле и может достигать 180–200 °С и более. Таким образом, можно утверждать, что отвод тепла от эмиттерного электрода не эффективен. В этих условиях важным становится охлаждение магнита для сохранения его параметров.

Одним из вариантов решения этой проблемы может быть вынос магнита в такую зону источника, в которой температура существенно не растет даже при критических тепловых нагрузках на электроды разрядной камеры. Однако, перенос магнита не должен существенно изменить величину и конфигурацию магнитного поля в разрядной камере и электронно-оптической системе. В связи с этим выбран простой вариант новой конструкции разрядной камеры источника. В этом варианте расположение магнита оставалось практически неизменным, однако за счет изменения схемы герметизации разрядной камеры магнит теперь имел непосредственный контакт с теплоносителем – трансформаторным маслом.

Для проверки распределения магнитного поля в новой конструкции разрядной камеры выполнен расчет величины и конфигурации магнитного поля.

На рис. 5, *а* представлены конструкции разрядных камер с типичным (слева) для источника электронов с плазменным эмиттером расположением магнита и вынесенным в заполненный маслом объем (справа), а также результаты расчетов распределения магнитного поля в них (рис. 5, *б*).

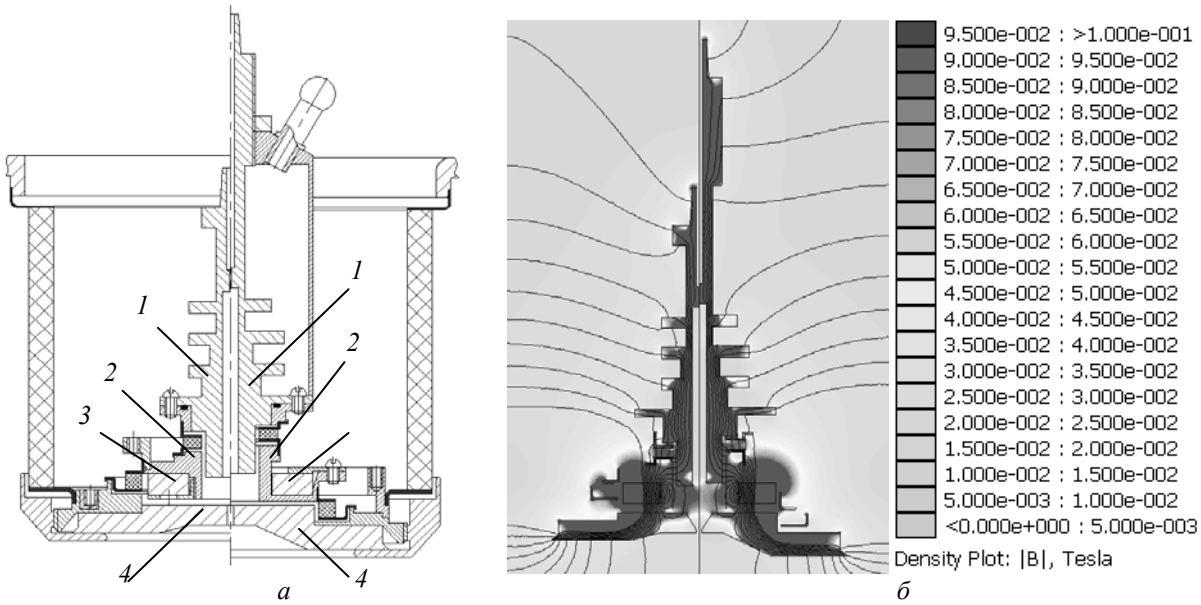

Рис. 5. Конструкция разрядных камер (*а*) и распределения магнитного поля в них (*б*):
1 – полый катод; *2* – анод; *3* – магнит; *4* – эмиттерный электрод

Оба варианта конструкций (см. рис. 5, *а*) обеспечивают в разрядном промежутке магнитное поле с индукцией не менее 0,09–0,1 Тл. Вынос магнита в объем, заполненный трансформаторным маслом, практически не изменяет распределение магнитного поля в нем (рис. 6). Силовые линии этого поля практически параллельны оси разрядной камеры.

Полученные результаты были использованы при создании источника по заказу концерна ТВЭЛ для Чепецкого механического завода. Разработанный источник работает в составе установки заварки и дегазации заготовок для промышленного производства сверхпроводящих материалов обмоток соленоидов термоядерного реактора в рамках программы ИТЭР.

Источник предназначен для герметизации (заварки) изделий, содержащих ниобий – титановый сплав с оболочкой из меди, из которых в дальнейшем получают сверхпроводящую проволоку. Для формирования сварного шва с необходимыми характеристиками некоторые типы медных оболочек (наиболее массивные) предварительно нагревают до высокой температуры, затем дополнительно прогревают расфокусированным электронным пучком зону сварки. Продолжительность сварочного цикла составляет 40–50 мин, величина тока пучка 140–150 мА при токе разряда порядка 450 мА. В таких режимах разогретая до высокой температуры медная оболочка и сама зона сварки с жидкометаллической ванной являются источниками интенсивной тепловой нагрузки для пушки. Кроме того, электроды разрядной камеры при генерации плазмы в предельных по мощности режимах выступают источниками теплового излучения. Конструкция источника с вынесенным в заполненный маслом объем магнитом обеспечила стабильную работу установки.

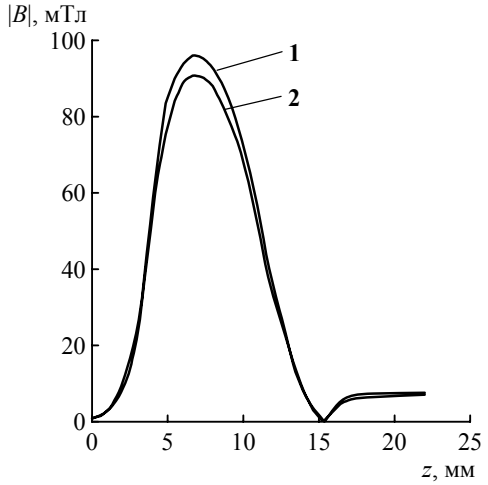

Рис. 6. Распределение модуля магнитной индукции вдоль оси источника электронов с плазменным эмиттером: *1* – магнит в анодном блоке со стороны вакуумной части разрядной камеры; *2* – магнит в масле

Заключение

Таким образом, в современных конструкциях разрядных камер источников электронов с плазменным эмиттером наиболее уязвимым со стороны теплового воздействия является магнит. При размещении магнита в вакуумном объеме разрядной камеры основным источником его нагрева является близко расположенный эмиттерный электрод. Следовательно, для работы в условиях термически нагруженной разрядной камеры необходимо размещать магнит в таком месте, которое менее подвержено интенсивному тепловому воздействию или эффективно охлаждается. При этом принципиально важно сохранить конфигурацию магнитного поля в разрядном промежутке и областях электронно-оптической системы.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг. (Госконтракт №П2171 от 09.11.09 г.).

Литература

1. Плазменные процессы в технологических электронных пушках / М.А. Завьялов, Ю.Е. Крейндель, А.А. Новиков, Л.П. Шантурин. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 256 с.

2. Белюк С.И. Промышленное применение электронных источников с плазменным эмиттером / С.И. Белюк, И.В. Осипов, Н.Г. Ремпе // Известия вузов. Физика. – 2001. – Т. 44, № 9. – С. 77–84.

3. Оборудование для электронно-лучевых процессов / С.Ю. Корнилов, И.В. Осипов, А.Г. Рау, Н.Г. Ремпе // Приборы. – 2007. – Т. 84, № 6. – С. 8–12.

4. Current Status of the Plasma Emission Electronics: II. Hardware / A.S. Bugaev, A.V. Vizir, V.I. Gushenets et al. // Laser and Particle Beams. – 2003. – Vol. 21, № 2. – P. 139–156.

Корнилов Сергей Юрьевич
Канд. техн. наук, ассистент каф. физики ТУСУРа
Тел.: 8-913-842-75-25
Эл. почта: kornilov@ms.tusur.ru

Осипов Игорь Владимирович
Канд. физ.-мат. наук, доцент каф. физики ТУСУРа
Тел.: (382-2) 41-48-59
Эл. почта: osipov@main.tusur.ru

Ремпе Николай Гербертович
Д-р техн. наук, профессор каф. физики ТУСУРа
Тел.: (382-2) 41-48-59
Эл. почта: remnik@fet.tusur.ru

Kornilov S.Y., Osipov I.V., Rempe N.G.

Electron source with the plasma emitter for the usage in the regime of thermally loaded discharge chamber

The article is concerned with the results of theoretical and experimental investigations of operating modes of electron source with plasma emitter when discharge chamber elements are thermally intensively loaded. It is shown that the constant magnet of the discharge chamber is the most vulnerable to temperature influence. The peculiarities of electron source design when operated in the conditions of intensive influence of a thermal load are described. The application of the developed source to technology of superconducting materials creation under program ITER is given in the article.
Keywords: electron source with plasma emitter, constant magnet, thermal load.