

Исследования систем преобразования тока на основе термоэмиссионной высокотемпературной плазменной электроэнергетики

© В.В. Онуфриев, А.Б. Ивашкин, В.В. Синявский

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

Рассмотрены работы кафедры «Плазменные энергетические установки» по термоэмиссионным устройствам и высокотемпературным вентилям для систем преобразования тока космических энергодвигательных установок. Приведены основные достижения в области разработки и исследования термоэмиссионных приборов плазменной электроэнергетики.

Ключевые слова: термоэмиссионный преобразователь, термоэмиссионный реактор, плазменный вентиль, плазменный преобразователь тока, электроракетная двигательная установка.

Введение. Разработка космических ядерных энергетических установок (ЯЭУ) была начата в нашей стране в конце 1950-х — начале 1960-х годов и проводилась одновременно по нескольким направлениям.

Благодаря совместной работе ряда организаций во главе с ГП «Красная звезда» и ГНЦ РФ ФЭИ была создана и в 70–80-х годах прошлого века успешно эксплуатировалась в космосе ЯЭУ «Бук» с термоэлектрическим генератором мощностью в несколько киловатт [1]. Кроме того, ими были спроектированы термоэмиссионные ЯЭУ «Топаз» электрической мощностью 6 кВт [1, 2], в течение года успешно работавшие на орбите в составе космических аппаратов (КА) «Плазма-А» («Космос-1818» и «Космос-1867»).

При участии ряда организаций во главе с РНЦ «Курчатовский институт», ЦКБМ (г. Санкт-Петербург) и НИИ НПО «Луч» была создана термоэмиссионная ЯЭУ «Енисей» мощностью 5 кВт, которая прошла успешные наземные ядерно-энергетические испытания в течение полутора лет [3].

Выполненные разработки позволили стать нашей стране мировым лидером в создании космических ЯЭУ.

В настоящее время на основе отечественного опыта создания и эксплуатации космических энергоустановок ведется разработка ЯЭУ с термоэмиссионным реактором-преобразователем (ТРП) по технологии «Топаз» электрической мощностью 25...100 кВт в качестве мощного, энергоемкого и компактного источника энергии космического назначения [4, 5].

В 60–80-х годах прошлого столетия в РКК «Энергия» в сотрудничестве с ГНЦ РФ ФЭИ и другими организациями разрабатывалась

космическая ЯЭУ по высокотемпературной литий-ниобиевой технологии с ТРП мощностью 500...600 кВт для электропитания электро ракетных двигателей (ЭРД) межорбитального буксира «Геркулес» [5]. По этой технологии могут быть созданы термоэмиссионные ЯЭУ мощностью от 150 кВт до нескольких мегаватт, способные обеспечить с повышенной эффективностью выполнение ряда энергоемких задач в околоземном и дальнем космосе [6].

Рассматриваемые ЯЭУ могут успешно функционировать в космосе в условиях внешней радиации и магнитных полей, метеорных потоков, высоких температур и их резких колебаний.

Термоэмиссионный преобразователь является источником электроэнергии, генерирующим постоянный ток при относительно низком напряжении (до 150 В). В то же время потребителям энергии, как правило, требуется более высокое напряжение, например для мощных ЭРД типа стационарных плазменных двигателей (СПД) и двигателей с анодным слоем (ДАС) необходимы напряжения в сотни и тысячи киловатт. Поэтому в состав ЯЭУ с ТРП должна входить система преобразования тока (СПТ), способная обеспечить электропитание при повышенном напряжении [7].

Разработка энергоемких СПТ для питания мощных ЭРД является актуальной и достаточно сложной научно-технической задачей, решение которой позволит создавать энергодвигательные установки и космические аппараты нового поколения с высокими эксплуатационными характеристиками и низкими массогабаритными параметрами.

В связи с актуальностью этой задачи на кафедре «Плазменные энергетические установки» в 60-е годы XX века было сформировано научное направление исследования физических процессов как в термоэмиссионных преобразователях, так и в термоэмиссионных вентилях на парах цезия и бария для создания элементной базы СПТ космических ЯЭУ. Возглавил это направление канд. техн. наук, доцент В.В. Яминский. Под его руководством трудился коллектив аспирантов и инженеров, который создал экспериментальную базу для стендовой отработки моделей перспективных вентилях для СПТ. Это направление развивалось в тесном сотрудничестве с такими ведущими предприятиями, как НПО «Энергия» (ныне РКК «Энергия» им. С.П. Королева), НПО «Красная звезда» (ОАО «Красная звезда»), ЦНИИМаш, НИИ тепловых процессов (ИЦ им. М.В. Келдыша), Институт атомной энергии (РНЦ «Курчатовский институт»), ФТИ им. А.Ф. Иоффе, ВНИИТ, а также с МАИ им. С. Орджоникидзе и ХАИ им. В.П. Чкалова.

Специфика исследований на кафедре потребовала создания первых вакуумных стендов с безмасляной откачкой для повышения чистоты экспериментов, освоения отработки изделий с цезий-бариевым наполнением, методов их диагностики (зондовой и оптической), от-

работки макетов изделий в составе высокотемпературных стендов и организации длительных испытаний продолжительностью в несколько месяцев с непрерывным контролем и измерениями.

В.В. Яминский вырастил большую плеяду научных работников, которые внесли существенный вклад в разработку новых типов термоэмиссионных приборов плазменной электроэнергетики: М.К. Марахтанов, С.А. Мубояджан, Б.К. Феоктистов, А.Л. Баранников, А.А. Юрченко, В.В. Анташов, А.В. Пекшев, П.Ю. Пекшев, В.Г. Голубев, А.О. Потеряхин, Б.А. Сироткин, В.И. Суслов, В.В. Онуфриев. Работы велись в сотрудничестве с РКК «Энергия», ОАО «Красная звезда», ЦНИИМаш, МАИ и ФТИ им. А.Ф. Иоффе.

Творческий коллектив этого направления создал целый ряд новых термоэмиссионных устройств: различные сеточные ключевые элементы — на большие интегральные токи (до 600 А), с магнитным управлением, с микромодульной организацией межэлектродного зазора; лазерно-оптический термоэмиссионный преобразователь; высоковольтный плазменный термоэмиссионный диод (ВПТД): плазменный термоэмиссионный тиристор.

Далее приведены достижения кафедры, связанные с разработкой систем преобразования тока на основе цезиевых и цезий-бариевых приборов.

Научные исследования кафедры в направлении разработки плазменных высокотемпературных вентиляей. Первые работы, посвященные высокотемпературной преобразовательной технике, были связаны с созданием вентиль-анодов для ЭРД (С.А. Мубояджан, М.К. Марахтанов) и термоэмиссионных электрогенерирующих элементов (В.В. Яминский, Б.К. Феоктистов, В.В. Анташов, А.В. Пекшев). Исследования проводились для ОАО «Красная звезда» и РКК «Энергия». От предприятия «Красная звезда» работы возглавлял заместитель генерального директора В.И. Сербин, а от РКК «Энергия» — начальник отдела В.И. Бержатый, который работал в отделении М.В. Мельникова, одного из пионеров отечественной космической ядерной энергетики.

Наиболее существенный результат исследований был получен в НИР и НИОКР, направленных на создание высокотемпературных вентиляей плазменной электроэнергетики. В этих работах принял участие практически весь коллектив — преподаватели, научные сотрудники, инженеры и аспиранты.

Первыми работами стали исследования сеточных ключевых элементов (СКЭ) плоскоцилиндрической геометрии [8–13] (А.Л. Баранников, А.А. Юрченко, В.В. Анташов, П.Ю. Пекшев, А.О. Потеряхин) для космических СПТ, проводимые по договорам с РКК «Энергия». Исследования физики рабочего процесса, динамики управления, предельных режимов позволили сформулировать требования к высокотемпературному ключевому элементу:

- температура холодного электрода (сетки, анода) 1 000 К;
- плотность тока в проводящем состоянии 5...25 А/см²;
- удельная электрическая мощность до 1...5 кВт/см².

Результаты исследования проводящего состояния СКЭ показали, что в межэлектродном зазоре (МЭЗ) реализуется типичный несамостоятельный дуговой разряд с термоэмиссионным катодом — падение напряжения на разряде (в зависимости от давления паров наполнителя и длины МЭЗ) составило $\delta U_p = 1,5...5$ В при плотностях разрядного тока $j_p = 3...10$ А/см², что позволяет рассматривать СКЭ в качестве высокотемпературного вентиля в СПТ.

Эти работы позволили кафедре «Плазменные энергетические установки» сформировать методологию исследований рабочего процесса и его диагностики, развить инженерные решения в области высокотемпературной преобразовательной техники и методы проектирования термоэмиссионных вентиляей, тем самым создать новое направление в технике — проектирование высокотемпературных вентиляей плазменной электроэнергетики.

Дальнейшее развитие работ было связано с поиском эффективных методов управления СКЭ [10–12] (П.Ю. Пекшев, А.А. Юрченко, В.Г. Голубев, Б.А. Сироткин). Исследования потребовали детального изучения теплового состояния СКЭ, параметров разряда и характеристик управления. Особенно важно это было для разработки мощных СКЭ на интегральные токи до 1000 А.

Было предложено новое решение по управлению СКЭ — использование поперечного магнитного поля, что расширило возможности методов обрыва тока в сеточном ключевом элементе.

Экспериментальное исследование влияния внешних факторов на характеристики СКЭ в проводящем состоянии [11–13] (П.Ю. Пекшев, В.Г. Голубев, Б.А. Сироткин), а именно влияние внешнего магнитного поля, перпендикулярного протекающему в МЭЗ разрядному току, потенциала сетки относительно катодного потенциала за счет внешнего источника, показало эффективность управления током несамостоятельного дугового разряда (НДР). Указанные факторы снижали критическую плотность тока разряда, облегчали процесс гашения НДР в МЭЗ. Показано, что использование поперечного магнитного поля с небольшой индукцией (до 300 Гс) позволяет эффективно управлять параметрами НДР в парах цезия и бария.

Следующим этапом стали исследования динамики и устойчивости работы СКЭ в электрической цепи. Были получены первые результаты, свидетельствующие о возможности использования СКЭ как генератора колебаний. Исследования показали, что для обеспечения режима колебаний в СКЭ необходимо создать положительную обратную связь по напряжению, охватывающую не менее двух источников изменения проводимости вентиля. В качестве последних применительно к цезий-бариевым СКЭ могут выступать:

а) внутренние факторы: эмиссионная способность пленочного термоэмиссионного катода, соотношение скоростей ионизации и рекомбинации, подвижность заряженных частиц в МЭЗ, сечение прохождения тока;

б) внешние факторы: тепловой режим прибора, геометрия МЭЗ, давление паров наполнителя, внешнее магнитное поле (величина и направление), управляющий разряд.

В целом результаты многочисленных исследований свидетельствуют о технической возможности использования СКЭ с объемной сеткой в качестве источника колебаний в электрических цепях.

На кафедре были выполнены исследования, направленные на разработку СКЭ с микромодульной конструкцией МЭЗ [12] для возможности его совмещения с электрогенерирующим каналом ТРП (П.Ю. Пекшев, Б.А. Сироткин). Научно-исследовательские работы проводились для ОАО «Красная звезда» (руководитель В.И. Сербин, куратор В.А. Гефтер).

Суть организации микромодульного МЭЗ заключается в послыльном расположении между катодом и анодом СКЭ вспомогательных электродов и изоляторов, которые имеют несколько совмещенных отверстий. Внутри микрополостей МЭЗ протекает рабочий процесс. Такой подход позволил отказаться от бинарной смеси и использовать в качестве рабочего тела только цезий. Результаты экспериментального исследования показали эффективность конструкции и ее высокую управляемость. Управление СКЭ с микромодульной конструкцией поперечным магнитным полем по характеру схоже с управлением СКЭ с объемной сеткой. Гашение разряда обеспечивается магнитными полями с индукцией 120...500 Гс. Микромодульная конструкция СКЭ позволяет на основе пленочной технологии реализовать низковольтный сильноточный преобразователь тока (до 10 В).

Удельная масса опытных конструкций составила 0,1...0,2 кг/кВт, что в полной мере отвечало требованиям по этому параметру для вентилях СПТ ЭРД.

В качестве одного из альтернативных вариантов преподавателями и научными сотрудниками кафедры технически обосновано построение системы преобразования тока на СКЭ, которые формируют инверторную часть преобразователя тока. При этом выходной каскад преобразователя (повышенное напряжение) может быть расположен на удалении от высокотемпературной части (на традиционных твердотельных выпрямителях) либо выполнен на высокотемпературных плазменных вентилях (термоэмиссионных диодах).

Существенным вкладом в работы по СКЭ стали исследования А.А. Юрченко по управлению и динамике сильноточных СКЭ: был впервые получен режим модуляции тока до 450 А в длительных испытаниях [14].

Вторым этапом исследования и создания термоэмиссионных приборов плазменной электроэнергетики для СПТ космического назначения стал цикл приоритетных работ кафедры, посвященных высоковольтным термоэмиссионным вентилям (В.В. Онуфриев). Работы, выполняемые для РКК «Энергия», от предприятия курировал ведущий специалист — научный консультант корпорации В.В. Сиявский.

На кафедре впервые был разработан и создан полномасштабный макет ВПТД на рабочее напряжение до 2500 В [15–18]. Материалом диэлектрических элементов ВПТД был алюмонитрид бора (АБН-1), в качестве уплотнений по поверхности корпуса и электродов использованы танталовая фольга и синтетическая слюда. В процессе исследований были испытаны вентили со следующими электродами (катод указан первым): нержавеющая сталь — нержавеющая сталь (0Х18Н10Т); нержавеющая сталь — тантал; нержавеющая сталь — нитрид титана; молибден — молибден; молибден — нержавеющая сталь. Теплофизические параметры состояния вентиля изменялись в следующем диапазоне: давление паров рабочего вещества 1...50 Па (цезий) и 0,06...0,1 (барий); температура анода $T_a = 580...1050$ К; температура катода $T_k = 1200...1800$ К.

В результате исследования электрической прочности к обратному дуговому пробою цезиевых и бариевых вентилях впервые были получены зависимости пробойного напряжения от параметра Разора для различных материалов. Использование бариевого наполнения позволило увеличить коммутационную способность вентиля по мощности до $(1...2) \cdot 10^8$ Вт/м², что в пересчете на массу составляет не более 0,05 кг/кВт.

Наибольшая экспериментально достигнутая коммутационная способность вентиля составила:

- для цезиевого наполнения $3,6 \cdot 10^7$ Вт/м² при $T_a = 600...700$ К;
- для бариевого наполнения $2,5 \cdot 10^8$ Вт/м² при $T_a = 850$ К.

Исследование физического процесса, происходящего в высоковольтных вентилях, позволило впервые реализовать новый неэлектрический способ управления проводимостью и новый тип приборов — плазменный тиристор [19–20] (В.В. Онуфриев).

Высокий научный уровень проведенных исследований подчеркивают многочисленные оригинальные публикации коллектива в ведущих отечественных академических и отраслевых журналах, таких как «Журнал технической физики», «Известия РАН. Энергетика», «Известия СО Академии наук СССР», «Атомная энергия», «Теплофизика высоких температур», «Электронная техника. Серия “Газоразрядные приборы”».

Достижения коллектива кафедры в разработке приборов плазменной электроэнергетики позволили НИИ ЭМ МГТУ в 2004 г. по-

лучить статус головной организации по термоэмиссионным приборам плазменной электроэнергетики для космической техники.

В результате проведенных научных исследований по направлению бортовой энергетики на кафедре были защищены десять кандидатских и одна докторская диссертация.

Направление бортовой космической энергетики по-прежнему является одним из ведущих на кафедре. В настоящее время проводятся проектные исследования массоэнергетических и теплоэлектрических характеристик высокотемпературных систем преобразования тока на термоэмиссионных вентилях плазменной электроэнергетики, изучаются емкостно-индуктивные свойства и резонансные явления в системе ТРП — термоэмиссионный вентиль — нагрузка [21–24].

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Грязнов Г.М. *Космическая атомная энергетика и новые технологии (Записки директора)*. Москва, ФГУП «ЦНИИАтоминформ», 2007, 136 с.
- [2] Пономарев-Степной Н.Н. Ядерная энергетика в космосе. *Атомная энергия*, 1989, т. 66, № 6, с. 371–373.
- [3] Кухаркин Н.Е., Пономарев-Степной Н.Н., Усов В.А. *Космическая ядерная энергетика (ядерные реакторы с термоэлектрическим и термоэмиссионным преобразованием — «Ромашка» и «Енисей»)*. Пономарев-Степной Н.Н., ред. Москва, ИздАт, 2008, 146 с.
- [4] Андреев П.В., Жаботинский Е.Е., Никонов А.М. Перспективы использования термоэмиссионных ЯЭУ для межорбитальных перелетов космических аппаратов в околоземном пространстве. *Атомная энергия*, 1992, т. 73, № 5, с. 346–350.
- [5] Синявский В.В. О работах РКК «Энергия» имени С.П. Королева в области создания ядерно-энергетических установок и ядерных электроракетных двигательных установок большой мощности. *Ракетно-космическая техника. Тр. РКК «Энергия». Сер.12*, 2007, вып. 1–2, с. 8–19.
- [6] Легостаев В.П., Лопота В.А., Синявский В.В. Эффективность применения космических ядерных энергетических и электроракетных двигательных установок. *Космическая техника и технологии*, 2013, № 1, с. 3–11.
- [7] Онуфриев В.В., Марахтанов М.К., Гришин С.Д., Синявский В.В. Выбор параметров систем преобразования тока в космических ЯЭУ большой мощности. *Атомная энергия*, 2000, т. 89, вып. 1, с. 78–81.
- [8] Баранников А.Л., Пекшев П.Ю. Газоразрядные приборы с отрицательной проводимостью. *Известия СО АН СССР*, 1977, № 8, вып. 2, с. 140.
- [9] Баранников А.Л., Пекшев П.Ю. Особенности рабочих процессов в сильноточных газоразрядных приборах с отрицательной проводимостью. *Известия СО АН СССР*, 1978, № 8, вып. 2, с. 140.
- [10] Анташов В.В., Баранников А.Л., Пекшев П.Ю. Управление газовым разрядом путем изменения его вольт-амперной характеристики и линии нагрузки. *Тр. МВТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Энергетические установки»*. Москва, 1978, с. 71.
- [11] Пекшев П.Ю., Баранников А.Л., Голубев В.Г. Возможность расширения зоны работоспособности управляющего электрода в трехэлектродном Cs-Va термоэмиссионном преобразователе. *Журнал технической физики*, 1977, т. 47, вып. 6, с. 1341.

- [12] Баранников А.Л., Пекшев П.Ю., Голубев В.Г., Потеряхин А.О. Влияние магнитного поля на обрыв низковольтного дугового разряда. *Электронная техника. Сер. 4. Электровакуумные и газоразрядные приборы*, 1978, № 3, с. 25.
- [13] Вошедченко Б.М., Макаров А.Н., Морозкин В.И., Пекшев П.Ю., Потеряхин А.О., Сарбучев С.Н., Сироткин Б.А. Исследование микромодульной конструкции термоэмиссионных приборов. *Тез. докл. Конф. по термоэмиссионному преобразованию тепловой энергии в электрическую*. Обнинск, 1979, с. 33–36.
- [14] Богомолов И.В., Кузин Г.А., Юрченко А.А. Экспериментальное исследование высокотемпературных вентилей на большие плотности тока. *Тез. докл. Конф. по термоэмиссионному преобразованию тепловой энергии в электрическую*. Обнинск, 1979, с. 96–97.
- [15] Онуфриев В.В., Гришин С.Д. Экспериментальное исследование электрической прочности к обратному дуговому пробою термоэмиссионного диода с цезиевым наполнением. *Теплофизика высоких температур*, 1996, т. 34, № 3, с. 482–485.
- [16] Онуфриев В.В., Сиявский В.В., Лошкарев А.И. Электроэнергетические характеристики термоэмиссионного высоковольтного диода для космических энергодвигательных установок. *Известия РАН. Энергетика*, 2006, № 1, с. 87–97.
- [17] Онуфриев В.В. *Способ выпрямления переменного тока и устройство для его осуществления*. Пат. № 2111605 Российская Федерация, 1998, бюл. № 14.
- [18] Онуфриев В.В., Сиявский В.В. *Термоэмиссионный вентиль системы выпрямления тока космической энергоустановки*. Пат. № 2135740 Российская Федерация, 2002, бюл. № 36.
- [19] Онуфриев В.В. *Способ включения плазменного тиристора и устройство для его осуществления*. Пат. № 2144716 Российская Федерация, 2000, бюл. № 2.
- [20] Онуфриев В.В., Сиявский В.В. Результаты экспериментального исследования высоковольтного термоэмиссионного вентиля с тепловым управлением. *Известия РАН. Энергетика*, 2009, № 1, с. 36–42.
- [21] Онуфриева Е.В., Онуфриев В.В., Ивашкин А.Б., Сиявский В.В. Неустойчивый режим работы термоэмиссионного вентиля системы преобразования тока космической энергодвигательной установки. *Ракетно-космическая техника. Сер. XII*, 2009, вып. 1–2, с. 39–47.
- [22] Онуфриев В.В., Онуфриева Е.В., Сиявский В.В. Высокотемпературные системы преобразования тока перспективных космических энергодвигательных установок. *Известия РАН. Энергетика*, 2009, № 4, с. 137–144.
- [23] Онуфриева Е.В., Онуфриев В.В., Яминский В.В. Разработка плазменных термоэмиссионных диодов высокотемпературного преобразователя тока энергодвигательных установок. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Машиностроение, 2011, спец. вып. «Ионно-плазменные технологии»*, с. 70–73.
- [24] Онуфриева Е.В., Онуфриев В.В., Ивашкин А.Б., Сиявский В.В. Моделирование резонансных свойств и работы цепи термоэмиссионный реактор-преобразователь — термоэмиссионный вентиль — индуктивная нагрузка космической энергодвигательной установки. *Известия РАН, Энергетика*, 2013, № 1, с. 68–78.

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Онуфриев В.В., Ивашкин А.Б., Сиявский В.В. Исследования систем преобразования тока на основе термоэмиссионной высокотемпературной плазменной электроэнергетики. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, вып. 10. URL: <http://engjournal.ru/catalog/machin/plasma/1033.html>

Онуфриев Валерий Валентинович — д-р техн. наук, профессор кафедры «Плазменные энергетические установки» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор 90 публикаций. e-mail: onufryev@bmstu.ru

Ивашкин Анатолий Борисович — канд. техн. наук, доцент кафедры «Плазменные энергетические установки» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор 70 публикаций. e-mail: anatolyivashkin@yandex.ru

Сиявский Виктор Васильевич — д-р техн. наук, профессор кафедры «Плазменные энергетические установки» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор 200 публикаций. e-mail: Viktor.Sinyavsky@rsce.ru