

## **Разработка и исследование катодных узлов сильноточных плазменных устройств на кафедре «Плазменные энергетические установки»**

© Г.К. Клименко, А.А. Ляпин

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

*Изложена история развития двигательного направления на кафедре плазменных энергетических установок. С момента создания кафедры большое внимание уделяла исследованию и разработке сильноточных плазменных устройств, в том числе электроракетных двигателей. В хронологическом порядке показаны ключевые моменты в разработке и испытаниях электродуговых и торцевых сильноточных двигателей, электродов для униполярных генераторов, вакуумных плавильных печей и атмосферных плазмотронов, катодов-компенсаторов для стационарных плазменных двигателей и в разработке методик ускоренных испытаний таких катодов.*

**Ключевые слова:** *катод, электроракетные двигатели, катод-компенсатор, сильноточные устройства, плазменная техника.*

Кафедра «Плазменные энергетические установки» первоначально была ориентирована на подготовку специалистов в области электроракетных двигателей (ЭРД) и энергетических установок. Кафедра была создана, когда во многих организациях уже велись практические работы в этой области и сложились концепции перспективных электроракетных установок. Следуя традиции МВТУ им. Н.Э. Баумана, сотрудники кафедры активно включились в работы по созданию такой техники.

Практическое начало работ на кафедре было связано с созданием электродугового двигателя на газах, в результате чего была заложена экспериментальная база, которая позволила расширить круг решаемых задач. Были созданы также системы электропитания и вакуумные установки, начата разработка импульсных плазменных двигателей и ускорителей, ионных двигателей на переменном токе, термоэмиссионных преобразователей, а также других перспективных направлений применения плазменной техники, что всячески поддерживал заведующий кафедрой С.Д. Гришин.

На этом этапе создания плазменной техники одной из актуальных проблем стало обеспечение работоспособности и долговечности катодных узлов плазменных устройств. В решение этой проблемы внесли свой вклад многие сотрудники кафедры: С.Д. Гришин, А.М. Дороднов, Н.П. Козлов, Г.К. Клименко, В.Н. Ковалев, М.К. Марахтанов, А.А. Ляпин, Я.А. Помелов, А.М. Зимин, В.И. Хвесюк, М.М. Чурсин, В.В. Яминский и другие.

В основу разработки мощной космической энергодвигательной установки РКК «Энергия» им. С.П. Королева (ранее ОКБ-1) была заложена концепция оригинального термоэмиссионного низковольтного генератора и сильноточного электромагнитного электроракетного двигателя. Для этого двигателя требовался сильноточный катод, и кафедра приняла участие в создании и исследовании таких катодных узлов [1, 2].

В лаборатории кафедры совместно с ОКБ-1 были проведены испытания модели сильноточного плазменного двигателя для исследования катодных узлов двигателей, работающих на литии в диапазоне токов разряда 300...1000 А. В работе принимали участие сотрудники ОКБ-1 В.П. Агеев, А.М. Долгопятов, В.Г. Островский, А.А. Мартинсон и МВТУ им. Н.Э. Баумана Г.К. Клименко, В.Н. Ковалев, М.М. Чурсин. Для проведения этих испытаний были созданы: вытеснительная система подачи лития с подсистемой для дозаправки литием без разгерметизации вакуумной камеры и с возможностью регулирования и измерения расхода лития в ходе испытаний; вакуумная система с водоохлаждаемой камерой, позволяющая длительно работать при значительной мощности двигателя; система электропитания постоянным током для работы на токах до 1200 А.

В начале исследований стало понятно, что перспективным является применение многополостного катода с подачей в полости рабочего вещества. Основными стали следующие направления работы: создание конструкций работоспособных катодных узлов; исследование их рабочих процессов; оптимизация конструкций, размеров их элементов, режимов работы; определение характеристик износа и поиск путей совершенствования катодных узлов.

Большая часть работ проводилась на многостержневых (проволочных) катодах. Были определены оптимальные режимы их работы по току разряда и расходу лития, а также оптимальные размеры стержней и связанные с этим характеристики рабочего процесса. Основная задача заключалась в определении характеристик износа катода, для чего требовались длительные (более 100 ч) испытания. Особенностью износа многостержневых катодов стало изменение формы полостей, которое приводило к существенному изменению формы и размеров рабочей поверхности и перераспределению тока на ней.

Были проведены исследования многополостных катодов различных конструкций с полостями разных форм и размеров. Изучалась работа катодов, выполненных из пористого вольфрама, с полостями в виде круглых цилиндрических отверстий, в виде одной полости с пористыми стенками, в виде спиральной полости на торце катода, а также многотрубчатых и многостержневых катодов. Каждая из исследованных конструкций имела свои особенности рабочего процесса, однако

ни одной из них нельзя было отдать предпочтение. В конечном счете было экспериментально установлено, что в многостержневых катодах полости, имеющие в сечении треугольную форму, в результате износа и перераспределения материала эмиттера превращаются в отверстия округлой формы, изменяя рабочую поверхность эмиттера. При дальнейшей работе катода полости на рабочем торце сливаются и на отдельном стержне образуется почти правильный конус высотой около трех диаметров стержня. Такая характерная выработка позволила геометрически моделировать износ катода при длительной работе. Были изготовлены катоды с набивкой из стержней, предварительно механически заостренных в виде конуса. Испытания таких «искусственно состаренных» катодов показали незначительное отличие их рабочих характеристик от катодов с набивкой из цилиндрических стержней, что позволило экстраполировать во времени полученные зависимости и прогнозировать ресурс катода [3].

В результате проведенного исследования было доказано, что сильноточный катод должен быть термоэмиссионным, многополостным, с равномерным распределением рабочего вещества по полостям, при этом полости должны иметь округлую или щелевую конфигурацию. Для обеспечения высокого ресурса эмиттер катода должен быть достаточно массивным, поэтому тонкостенные конструкции, обладающие хорошими характеристиками, практически неприемлемы.

Было показано, что основной способ снижения износа и соответствующего повышения ресурса — это оптимизация размеров и режима работы катодного узла, а также снижение рабочей температуры эмитирующих поверхностей, в частности, путем уменьшения работы выхода электронов из материала эмиттера. Традиционное введение активирующих присадок в материал эмиттера (легирование) оказалось бесперспективным ввиду быстрого уноса присадки из материала при высокой температуре катода. Попытки использования эмиттеров из материалов с низкой работой выхода, в частности из карбида титана, не удалось из-за низкой теплопроводности и хрупкости материала, оказавшегося неработоспособным в реальных условиях эксплуатации катода. Была успешно реализована подача активирующей присадки к рабочей поверхности эмиттера вместе с рабочим веществом — литием. В качестве присадки, снижающей работу выхода эмиттера (вольфрама), исследовались цезий и барий. В условиях работы сильноточного двигателя барий показал лучшие результаты, и в дальнейшем использовался именно он.

Это направление оказалось очень перспективным: было создано несколько типов устройств для подачи присадки. Сточасовые испытания катодного узла в составе модели двигателя на литии при токе 500 А показали работоспособность пористого вольфрамового катода

на литии с присадкой бария, устойчивость работы и стабильность характеристик процесса, а главное — существенное снижение температуры эмиттера и износа катода, что позволило прогнозировать работу катода по крайней мере еще на 100 ч. Полученные данные были использованы при создании в РКК «Энергия» сильноточного плазменного двигателя мощностью до 500 кВт на литии при токе разряда до 10 кА. Результаты испытаний этого двигателя позволили прогнозировать его ресурс до 1000 ч [4].

Работа по модернизации и исследованию характеристик катодного узла торцевого холловского двигателя была проведена совместно с НИИТП (ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша»). Изучались электрические характеристики двигателя типа «Крен» при работе на калии и на калии с присадкой бария. В конструкцию одноканального катодного узла была встроена система подачи бария, что позволило снизить приэлектродные потери энергии в двигателе. В результате была предложена новая схема многополостного катодного узла со встроенной системой подачи присадки, благодаря использованию которой удалось снизить температуру катода и уменьшить потери энергии. Эта работа выполнена сотрудниками кафедры Г.К. Клименко, М.Н. Черкасовым, М.М. Чурсиным совместно с сотрудниками НИИТП И.Н. Острцовым и А.А. Поротниковым. Логическим ее продолжением стали исследования по созданию сильноточного и низковольтного плазменного контакта для униполярного генератора. При этом был реализован самостоятельный аномальный кольцевой дуговой разряд в вакууме при напряжении 5,5 В и токе 400 А. В результате был изготовлен образец плазменного контакта диаметром 200 мм. Работа выполнена совместно сотрудниками кафедры Г.К. Клименко, К.В. Комиссаровым, А.А. Ляпиным, И.В. Николаевым, М.М. Чурсиным и сотрудниками НИИТП А.М. Костылевым и А.А. Садовниковым.

Совместно с ОКБ «Факел» проведен цикл работ по исследованию катодов-компенсаторов (КК) перспективных электроракетных двигателей. При проведении ресурсных испытаний изучались характеристики износа сильноточного катода перспективных двигателей на номинальный ток 50 А [5, 6]. Кроме того, исследовались процессы переноса тока и динамика износа эмиттера КК, что позволило разработать методики проведения ускоренных испытаний при работе на разных режимах — пусковом и установившемся. Были разработаны также оригинальные методики определения текущего износа без разрушения катодного узла и определения температуры рабочей поверхности канала эмиттера. Предложена оригинальная методика моделирования износа для ускорения испытаний и проведены длительные сравнительные испытания на стендах ОКБ «Факел», подтвердившие возможность существенного сокращения времени испытаний на стационарном режиме.

Проведены исследования износа сильноточного катодного узла КЭ-50 в пусковом цикле. Они осуществлялись сериями по 300, 300, 200 и 200 циклов (всего 1000 циклов) [7]. Была выявлена повышенная скорость износа эмиттера в пусковом цикле, а также другие особенности износа катодного узла. На основе этих исследований была предложена методика проведения испытаний по специальному циклу, позволяющему ускорить их в 3,5 раза. Работа проведена сотрудниками кафедры В.И. Кашенковым, Г.К. Клименко, В.Н. Ковалевым, А.А. Ляпиным, С.В. Пехтеревым, К.В. Комиссаровым, М.М. Чурсиным совместно с сотрудниками ОКБ «Факел» Б.А. Архиповым, В.А. Иванишко, Н.А. Масленниковым, В.М. Мурашко [8].

Работы по созданию сильноточных катодов для ЭРД нашли продолжение в разработке катодных узлов для плазменных вакуумных металлургических печей совместно с ВНИИЭТО. В частности, были разработаны сильноточные катодные узлы для использования при среднем вакууме (100...3000 Па). Катод испытывался на стендах МВТУ им. Н.Э. Баумана и ВНИИЭТО на токах разряда от 300 до 4000 А, через полости катода подавался плазмообразующий газ — аргон. Изучалось влияние давления в вакуумной камере и расхода плазмообразующего газа на характеристики работы многополостного катода и процессы эрозии материала эмиттера [9–13]. Было доказано, что при малых расходах аргона через катод доминирующим механизмом эрозии становится катодное распыление материала катода (вольфрама) ионами аргона. Было установлено пороговое значение энергии ионов аргона на вольфраме — 13 В [14]. В работе принимали участие сотрудники кафедры А.А. Ляпин, В.Н. Ковалев, М.М. Чурсин, а также сотрудники ВНИИЭТО В.В. Аверьянов и М.М. Крутянский.

В настоящее время существует тенденция к уменьшению массы и габаритов спутников (в частности, для телекоммуникаций), обусловленная миниатюризацией элементной базы, снижением энергопотребления приемо-передающей аппаратуры, увеличением срока жизни КА. Соответственно, повышаются требования к экономичности, надежности и долговечности двигательной установки, к улучшению ее массогабаритных характеристик. Кардинальным решением, позволяющим уменьшить непроизводительные потери рабочего тела через катод-компенсатор, являются разработка и внедрение безрасходных КК. В лаборатории кафедры «Плазменные энергетические установки» МГТУ им. Н.Э. Баумана в течение ряда лет ведутся работы, направленные на повышение газовой эффективности и переход к безрасходным катодам-компенсаторам. Исследования по данной тематике продолжаются. Сконструированы лабораторные модели безрасходных КК, экспериментально изучены особенности таких катодов и намечены пути создания эффективных безрасходных КК [15].

В заключение отметим, что накоплен большой опыт создания катодных узлов для различных условий работы. Этот опыт использовался и используется при подготовке специалистов в области плазменной техники. Ведутся работы по созданию новых типов многополостных сильноточечных катодных узлов, разрабатываются методики ускоренных испытаний [8, 16].

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Козлов Н.П., Хвесьюк В.И. К вопросу о влиянии давления на характеристики работы многополостного катода. *Теплофизика высоких температур*, 1976, т. 14, № 1.
- [2] Клименко Г.К., Ковалев В.Н., Лысаков В.Н., Ляпин А.А., Ткачев В.И., Чурсин М.М. Влияние внешнего магнитного поля на прикатодную область сильноточечного разряда в вакууме. *Журнал технической физики*, 1976, т. 46, № 10.
- [3] Ковалев В.Н., Ляпин А.А., Чурсин М.М. Теоретическая модель и метод расчета многоканального полого термокатада. *Источники и ускорители плазмы. Сб. Харьков*, 1978, вып. 3.
- [4] Агеев В.П., Быстров П.И., Островский В.Г. Сильноточечный стационарный ускоритель плазмы большой мощности. *Системы и средства бортовой энергетики. Сб. тр. НИИТП им. М.В. Келдыша*. Москва, 1993, вып. 3 (141), 1993, с. 124–133.
- [5] Кашенков В.И., Ковалев В.Н., Ляпин А.А., Пехтерев С.В., Чурсин М.М. Теоретические предпосылки ускоренных ресурсных испытаний катодов-компенсаторов в форсированном режиме. *Ракетно-космическая техника*, 1991, сер. IV, вып. 3 (131).
- [6] Клименко Г.К., Ляпин А.А. Предпосылки к созданию методики ускоренных испытаний катода-компенсатора электроракетных двигателей. *Инженерный журнал*, 2007, № 2.
- [7] Гришин С.Д., Кашенков В.И., Клименко Г.К., Ковалев В.Н., Ляпин А.А., Чурсин М.М. Ресурсные испытания катода-компенсатора на пусковых режимах и пути их ускорения. *Ракетно-космическая техника*, 1991, вып. 3 (131), с. 161–169.
- [8] Клименко Г.К., Ляпин А.А., Марахтанов М.К. Исследование стационарного плазменного двигателя (СПД) в лабораториях кафедры «Плазменные энергетические установки». *Электрореактивные системы ОКБ «Факел». Сб. докл. и ст.* Калининград, 2010, с. 175–194.
- [9] Ковалев В.Н., Ляпин А.А., Чурсин М.М. О работе многоканального катода в аргоне и азоте. *Теплофизика высоких температур*, 1981, т. 19, № 6.
- [10] Ковалев В.Н., Ляпин А.А., Чурсин М.М. Исследование работы многополостного вольфрамового катода в вакууме. *Теплофизика высоких температур*, 1977, т. 15, № 1.
- [11] Аверьянов В.В., Ковалев В.Н., Крутянский М.М., Лысаков В.Н., Ляпин А.А., Чурсин М.М. Исследование работы электродов сильноточечного плазмотрона при пониженных давлениях. *Теплофизика высоких температур*, 1977, т. 15, № 4.
- [12] Ковалев В.Н., Ляпин А.А., Чурсин М.М. Подвижный зонд для исследования плотной плазмы. *Приборы и техника эксперимента*, 1982, № 4.

- [13] Ковалев В.Н., Ляпин А.А., Пехтерев С.В., Чурсин М.М. Исследование плазмы полых катодов. *Известия СО АН СССР. Сер. техн. наук*, 1985, № 10, вып. 2.
- [14] Ковалев В.Н., Ляпин А.А., Чурсин М.М. О распылении высокопоточного вольфрамового катода. *Теплофизика высоких температур*, 1978, т. 16, № 2.
- [15] Клименко Г.К., Ляпин А.А. Пути совершенствования катодов-компенсаторов электроракетных двигателей. *Космонавтика и ракетостроение*, 2008, вып. 3 (52).
- [16] Ляпин А.А., Клименко Г.К. *Катодный узел*. Заявка 97116173/25 (016320) от 12.09.1997 г. Пат. № 2139590. Российская Федерация, 1997.

Статья поступила в редакцию 19.06.2013

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Клименко Г.К., Ляпин А.А. Разработка и исследование катодных узлов высокопоточных плазменных устройств на кафедре «Плазменные энергетические установки». *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, вып. 10. URL: <http://engjournal.ru/catalog/machin/plasma/1024.html>

**Клименко Георгий Константинович** родился 1935 г., окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1960 г. Канд. техн. наук, доцент кафедры «Плазменные энергетические установки» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор 200 научных трудов и изобретений в области плазменных технологий, плазменных двигателей, устройств и систем.  
e-mail: [gkk@land.ru](mailto:gkk@land.ru)

**Ляпин Александр Александрович** родился 1950 г., окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1973 г. Канд. техн. наук, доцент кафедры «Плазменные энергетические установки» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 70 научных работ и изобретений в области плазменных технологий, плазменных двигателей и устройств.  
e-mail: [laa@power.bmstu.ru](mailto:laa@power.bmstu.ru)