

## Секция 4

**Космическая энергетика и космические электроракетные  
двигательные системы – актуальные проблемы  
создания и обеспечения качества,  
высокие технологии**

**50 ЛЕТ КАФЕДРЕ МАИ «ЭЛЕКТРОРАКЕТНЫЕ ДВИГАТЕЛИ И  
ЭНЕГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ»**

*И.П. Назаренко*

*(Московский авиационный институт  
(национальный исследовательский университет))*

В феврале 1962 года приказом Министерства высшего и среднего образования СССР в Московском авиационном институте была организована кафедра «Космические ракетные двигатели и энергетические установки» (в настоящее время кафедра «Электроракетные двигатели и энергетические установки» - кафедра 208 МАИ).

Основателем и первым заведующим кафедрой 208 являлся профессор, д.т.н., заслуженный деятель науки и техники РСФСР А.В. Квасников. Под его руководством в 1956 году на кафедре «Ракетные двигатели» (кафедра 202), которой он в то время заведовал, была организована научно-исследовательская группа, которая занялась изучением возможности получения более высоких, чем в ЖРД, скоростей истечения. В 1957 году на факультете № 2 была организована студенческая группа, в учебный план которой были включены такие дисциплины, как «Квантовая механика», «Ядерная физика», «Физика плазмы», «Теория и расчет ядерных реакторов».

Учитывая потребности промышленности в кадрах, способных создавать космическую технику, декан факультета № 2 Г.Г. Гахун и профессор А.В. Квасников выступили с инициативой об организации на факультете новой кафедры. Эта инициатива была поддержана ректором института И.Ф. Образцовым и работниками промышленности М.В.

Мельниковым, Д.Д. Севруком и Н.Н. Пономаревым-Степным. Итогом этой деятельности явилось создание в 1962 году кафедры 208.

Одновременно с организационными мероприятиями в начале 60-х годов проводилась большая работа по созданию энергетической и экспериментальной базы кафедры, на которой предполагалось проведение как научных исследований, так и обучение студентов.

За 50 лет своего существования кафедра 208 подготовила свыше 1500 специалистов – инженеров в области электроракетных двигателей и энергетических установок, 200 кандидатов и 25 докторов наук. На кафедре выполнен большой объем научных исследований, по результатам которых в 1990 году ряд сотрудников был удостоен Премии Совета Министров СССР в области энергетики. В 1987 году на базе кафедры был организован научно-исследовательский институт прикладной механики и электродинамики (НИИПМЭ МАИ).

В настоящее время кафедра сумела сохранить свой научный потенциал. На кафедре работают 2 академика и 1 член-корреспондент РАН, 9 докторов и 10 кандидатов наук. Этот коллектив, несмотря на существующие трудности, способен решать перспективные научные и образовательные задачи.

#### **МЕЖВЕДОМСТВЕННОМУ СЕМИНАРУ ПО ЭРД 50 ЛЕТ**

*Л.А. Латышев, А.Н. Тимофеев*

*(Московский авиационный институт*

*(национальный исследовательский университет))*

В начале 60-х годов прошлого столетия у большинства организаций, так или иначе связанных с созданием новой техники – электроракетных двигателей, появилась потребность обмениваться первоначальным опытом разработки испытаний таких двигателей, однако, ведомственная разобщенность и различные инструкции не позволяли это делать официально, и информация передавалась в личном общении без чертежей, без информационных материалов. Это мешало дальнейшему быстрому развитию ЭРД. Только на двух семинарах в ИАЭ и в МАИ можно было обсуждать общетехнические прогнозные вопросы. Потребовалась помощь руководящих работников Совмина СССР и ряда Министерств, чтобы преодолеть эту «вредную» межведомственную разобщенность: вышло специальное Постановление руководящих органов, и с конца 1962 года в МАИ начал работать ежемесячно Всесоюзный, а затем Всероссийский межведомственный семинар, на котором обсуж-

дались конкретные трудности и результаты создания различных ЭРД и их систем. В год проходило 9-10 заседаний, на которых в начале обсуждались по два доклада от разных организаций на аналогичную тему, однако опыт показал, что для серьезного обсуждения лучше оставлять один доклад. Постепенно создался некий коллектив в 15-20 человек, который постоянно посещал семинар и подробно рассматривал каждую работу. Это настолько повысило авторитет семинара, что перед защитой диссертации и представлением отдельными организациями итоговых отчетов было желательно и почти необходимо заслушать эту информацию на заседаниях межведомственного семинара.

Всего за 50 лет в доброжелательной атмосфере было обсуждено более 400 работ. Есть надежды, что семинар продолжит свою работу ближайшие десятилетия и будет по-прежнему помогать развивать работы ЭРД.

**О ВКЛАДЕ КАФЕДРЫ МАИ «ЭЛЕКТРОРАКЕТНЫЕ ДВИГАТЕЛИ И  
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ» В РАБОТУ АКАДЕМИЧЕСКИХ ЧТЕНИЙ  
ПО КОСМОНАВИКЕ**

**А. П. Белоусов**

**(Московский авиационный институт  
(национальный исследовательский университет))**

Результаты научных исследований проводимых в МАИ сотрудниками кафедры «Электроракетные двигатели и энергетические установки» (кафедра 208), начиная с 1982 г., стали регулярно докладываться на научных чтениях по космонавтике.

В 1983 г. в рамках 7 научных чтений по космонавтике по решению Оргкомитета чтений впервые стали работать подсекция «Энергетические установки и электроракетные двигатели» в составе секции «Двигатели летательных аппаратов».

Инициатива в появлении данной подсекции принадлежала заведующему кафедрой 208 МАИ профессору Севруку Д.Д. и была поддержана членами Оргкомитета чтений профессором Гахуном Г.Г.

В дальнейшем подсекция была преобразована в самостоятельную секцию чтений, получила №4 и наименование, которое носит сегодня.

Руководителями подсекции, секции были утверждены председатели кафедры 208 МАИ профессора Д.Д. Севрук, Е.А. Яковлев и ст. научный сотрудник, к.т.н. А.П. Белоусов, а также представитель Харьковского двигательного института профессор Н.В. Белан.

На первом заседании вновь образованной подсекции из 10 заслушанных докладов в 7 в качестве авторов и соавторов участвовали 12 представителей кафедры 208.

В 1991 г. и в 1995 г. на пленарных заседаниях Чтений с докладами выступали профессора кафедры 208 Л.А. Латышев и Л.А. Квасников.

С активным участием сотрудников кафедры 208 были проведены специальные заседания, посвященные памяти С.П. Королева, представителей космической отрасли вузовской науки М.В. Мельникова, Д.Д. Севрука, С.Д. Гришина, А.И. Морозова, А.В. Квасникова, В.А. Храброва, В.Б. Тихонова, Ю.П. Рылова, И.Г. Паневина, внесших большой вклад в разработку и исследования энергосиловых установок и подготовку специалистов данного профиля.

Темы докладов представителей кафедры 208 охватывали круг научно-технических проблем, касающихся не только процессов в космических энергосиловых установках, но и практического применения для выполнения конкретных космических полетов с учетом условий эксплуатации в процессе полета, а также подготовки специалистов для космической отрасли.

Всего с 1982 по 2011 г. из 450 докладов по тематике секции №4, представленных в Оргкомитете чтений, в 157 авторами и соавторами являлись 65 сотрудников кафедры 208, причем на их долю в отдельные годы приходилось 50% и более всех докладов, заслушанных на заседаниях секции.

**ИСТОРИЯ СОВМЕСТНОЙ РАБОТЫ КАФЕДРЫ МАИ «ЭЛЕКТРОРАКЕТНЫЕ ДВИГАТЕЛИ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ» И КАФЕДРЫ МГТУ им. Н.Э.БАУМАНА «ПЛАЗМЕННЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ»**

***М.К. Марахтанов***

***(МГТУ им. Н.Э.Баумана)***

Две кафедры, № 208 и Э-8, были созданы в МАИ им. Серго Орджоникидзе и в МВТУ им. Н.Э.Баумана в середине 60-х годов прошлого века (1962 и 1963 гг. соответственно). Их задачей стала подготовка инженеров-механиков по специальности «Двигатели летательных аппаратов», которые предназначались для околоземных и межпланетных полетов. Одна из кафедр называется теперь «Электроракетные двигатели, энергофизические и энергетические установки» (МАИ), а другая – «Плазменные энергетические установки» (МГТУ), но обе по-прежнему не расстаются со своей первоначальной специализацией. Много общих

интересов связывает наши кафедры вот уже полвека. Совместные научные конференции, доклады студентов, аспирантов и преподавателей, обмен учебными пособиями. Мы помогали друг другу техническими средствами, такими как цезий и ксенон, узлы тягомеров и измерителей температуры и т.д., пользуемся чертежами и техническими описаниями установок. Выпускники обеих кафедр трудятся на родственных предприятиях и даже руководят ими. Многолетняя дружба связывала прежде и связывает до сих пор многих преподавателей наших кафедр. Ежегодные «Королевские чтения» вносят плодотворную лепту в союз и соперничество обоих коллективов.

#### **ОПЫТ НАУЧНОГО СОТРУДНИЧЕСТВА КАФЕДР МАИ В ОБЛАСТИ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ЭНЕРГЕТИКИ**

***А.А. Фармаковская***

***(Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет))***

Даже само словосочетание “электрохимическая энергетика” обуславливает взаимосвязь химии и энергетики, что в масштабах МАИ означает необходимость научного сотрудничества двух кафедр – кафедры химии (908) и кафедры энергетики (208). Это сотрудничество возникло практически со дня основания кафедры 208, которой в 2012 году исполняется 50 лет. Это сравнительно молодая кафедра по сравнению с кафедрой химии, которая является ровесницей института, а он в 2010 году отметил 80-летний юбилей.

Изначально совместное сотрудничество развивалось под руководством профессоров кафедры 208 Л.А. Квасникова и Л.Л. Клочковой и доцента кафедры химии И.А. Бровкиной. Ими были заложены основы и намечены будущие перспективы использования научных достижений и методических приёмов химии в разработке инженерами химических источников тока. Ещё Джон Бернал, английский физик и социолог науки, один из основоположников науковедения, писал, что “Основное занятие учёного состоит в том, чтобы найти, как сделать вещь, а дело инженера — создать её”.

Химические аспекты энергетики и в настоящее время являются приоритетным направлением как фундаментальной, так и прикладной науки, успешное решение задач которой невозможно без интеграции усилий химиков и техников.

За годы совместной работы в области электрохимической энергетики сотрудниками двух кафедр МАИ были проведены многочисленные исследования свойств рабочих тел и процессов в самых разных химических источниках тока. Это и высокотемпературные источники: Li-нитратный, Li-S и Na-S аккумуляторы, и низкотемпературный воздушно-алюминиевый ЭХГ, в разработке которого были достигнуты наибольшие успехи.

Необходимо отметить, что на разных этапах для решения отдельных частных проблем к работе привлекались сотрудники и других кафедр МАИ — технологии металлов, материаловедения, деталей машин, графики, но научное сотрудничество кафедры химии и кафедры энергетики за все эти годы не прерывалось никогда, несмотря на смену поколений учёных и инженеров.

Направление алюмоводородной энергетики, которое мы совместными усилиями разрабатываем в настоящее время, поддерживается грантами РФФИ, контрактами с академическими и отраслевыми институтами.

По результатам совместных работ опубликовано около двухсот научных работ, получено 8 патентов, защищена одна докторская и 17 кандидатских диссертаций и готовятся ещё 3.

В научных исследованиях кафедр принимали и принимают участие студенты, выполняя курсовые и дипломные работы, делая доклады на всероссийских и международных конференциях, некоторые из которых были отмечены золотыми и серебряными медалями и дипломами.

Результаты научных разработок обеих кафедр используются при обновлении учебных программ, лекционных курсов, практических занятий и лабораторных работ по дисциплинам “Физическая химия” и “Энергоустановки летательных аппаратов”.

На кафедрах проводится активная подготовка специалистов высшей квалификации по специальности “Энергоустановки на возобновляемых видах энергии” через аспирантуру МАИ.

Хочется верить, что талантливый и сплочённый коллектив научной группы из сотрудников двух кафедр, переживая радости и трудности совместной работы, не остановится на достигнутом и, в соответствии с требованиями времени, будет успешно развивать направление алюмоводородной энергетики, разрабатывая пути и методы повышения эффективности соответствующих энергетических установок и внедряя их в промышленность.

**О ЖИЗНИ И ТВОРЧЕСТВЕ С.А.БАКАНОВА – ВЫПУСКНИКА  
ФАКУЛЬТЕТА «ДВИГАТЕЛИ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ»**

*Е.П.Мышелов*

*(Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет))*

Главный конструктор калининградского ОКБ «Факел» Сергей Александрович Баканов был настоящим русским самородком, талант и творческие способности которого позволили ему внести свой вклад в исследования, разработку и организацию производства электрореактивных двигателей, стать известным автором популярных лирических стихов и песен.

С.А. Баканов является автором целого ряда патентов на оригинальные технические решения в области применения технологических приложений по низкотемпературным плазменным ускорителям, системам регулирования стационарных силовых электроракетных двигателей, работающих на щелочных металлах.

Песни и стихи С.А. Баканова до сих пор популярны в студенческой и молодежной среде.

Память о С.А. Баканове как о замечательном человеке, представляющем собой высоконравственную и творческую личность, живет в Московском Авиационном Институте, его жизнь является замечательным примером для молодого поколения.

**РОЛЬ ИССЛЕДОВАНИЙ Е.Ю.КРАСИЛЬНИКОВА В РАЗВИТИИ  
СОВРЕМЕННОЙ ГИДРОГАЗОДИНАМИКИ**

*И.П. Назаренко<sup>1</sup>, В.Г. Свиридов<sup>2</sup>*

*(1 - Московский авиационный институт*

*(национальный исследовательский университет)*

*2 – Московский энергетический институт*

*(технический университет))*

7 января 2010 г. ушел из жизни Евгений Юрьевич Красильников, д.т.н., профессор кафедры «Электроракетные двигатели, энергофизические и энергетические установки» Московского авиационного института (МАИ).

После окончания факультета «Двигатели летательных аппаратов» МАИ в 1957 г. Е.Ю. Красильников был распределен в НИИТП (в настоящее время Исследовательский центр имени М.В.Келдыша), где начал

работать в области магнитной гидродинамики, исследуя процессы теплообмена жидкометаллических теплоносителей в продольном магнитном поле. Дальнейшие исследования в области магнитной гидродинамики Е.Ю. Красильников продолжил в аспирантуре МАИ, успешно защитив кандидатскую диссертацию в 1966 г. Исследования теплообмена жидкометаллических теплоносителей в продольном магнитном поле в области малых чисел Рейнольдса с учетом возникающих мелкомаштабных неустойчивостей Е.Ю. Красильников продолжил и в последующие годы, защитив докторскую диссертацию в 1983 г. Хорошо известны экспериментальные результаты, полученные под руководством Е.Ю. Красильникова по исследованию влияния продольного магнитного поля на характер течения электропроводной жидкости в каналах. Им было показано, что магнитное поле стабилизирует течение жидкости при наличии достаточно длинного начального участка канала, длина которого пропорциональна числу Рейнольдса. Эти результаты, полученные впервые Е.Ю. Красильниковым, подтвердили универсальный характер действия закона Пуазейля относительно коэффициента гидравлического сопротивления при ламинарном течении жидкости.

Работы Е.Ю. Красильникова получили всесоюзное и международное признание. Одним из первых в МАИ Е.Ю. Красильников стал проводить исследования совместно с зарубежными коллегами. В рамках программы INTAS он провел комплекс исследований с немецкими учеными из Розендорф Центра (г. Дрезден) и французскими учеными из Гренобльского Университета (г. Гренобль).

В 1990 г. в составе коллектива Е.Ю. Красильникову была присуждена премия Совета Министров СССР за комплекс исследовательских работ в области космической энергетики.

Е.Ю. Красильников был талантливым и разносторонним ученым. В последние годы жизни он успешно работал над созданием физической модели зарождения и интенсификации тропических циклонов и торнадо, положив в основу электромагнитные процессы в атмосфере Земли. На основе полученных теоретических данных им было предложено несколько эффективных способов борьбы с этими опасными природными явлениями на начальной стадии их развития.

Е.Ю. Красильников подтвердил известное утверждение, что талантливый человек талантлив во всем. Он прекрасно рисовал и, как сам рассказывал своим друзьям, после окончания школы всерьез раздумывал, куда поступать - в МАИ или в Строгановский институт. Е.Ю. Красильни-



ков был разносторонним спортсменом. Он имел первые спортивные разряды по плаванию, велосипедному спорту, горным лыжам и теннису. До последних дней жизни активно катался на горных лыжах и играл в теннис. Оптимист по натуре, весёлый и остроумный собеседник, он всегда был душой компании друзей.

Е.Ю. Красильников оставил яркий след в науке, его труды об электромагнитных процессах в жидком металле, плазме еще многие годы будут служить отправной точкой для будущих исследователей.

#### **О НАУЧНОМ ЖУРНАЛЕ «КОСМИЧЕСКАЯ ЭНЕРГЕТИКА»**

***А.И.Никитин, Р.Г.Алексян***

***(Международный Институт Ноосферных Технологий)***

*e-mail: fabula@inbox.ru*

Сегодня специалисты, занятые обеспечением энергетических систем космической техники, встречаются практически один раз в году на 4-ой секции Королёвских чтений. На наш взгляд назрела необходимость иметь рабочий орган, работающий в течение года в промежутках между секциями. Таким органом может стать научный журнал "Космическая энергетика".

Космическая энергетика как направление космической техники сформировалась в 50-60-е годы. В 90-е годы, когда идеи рынка проникли в космическую отрасль, на высоком уровне сохранилось только проектирование и эксплуатация систем автономного энергопитания космических аппаратов, а проекты космических электростанций (КЭС) были свернуты. Между тем, в мире это направление продолжало развиваться. США, Япония и Европейское Космическое агентство уже публикуют календарные планы до 2020-2030 г.

Со временем необходимость КЭС стала очевидной. МКС уже сегодня нужны мощности в сотни киловатт. Возросло потребление электроэнергии космическими аппаратами, работающими на орбите 10-15 лет. Вместе с тем события, связанные с энергообеспечением жизни человечества на Земле (парниковый эффект, катастрофы на электростанциях), заставляют ученых искать более безопасные источники энергии, и КЭС рассматриваются как вариант таких источников. Поэтому создание КЭС стало чрезвычайно важной задачей, и работы по космической энергетике больших мощностей возобновились в рамках ведущейся в стране

модернизации экономики и поддержки государством высокотехнологичных проектов.

Основная цель журнала "Космическая энергетика" – отображать результаты научных исследований и практических разработок в области космической энергетики. Специалисты, занимающиеся научно-практической космической энергетикой, в некоторой степени будут объединены в рамках журнала, ибо систематически нигде более тематика космической энергетики у нас в стране не освещается. Журнал даст возможность ученым и инженерам, студентам и аспирантам оперативно знакомиться с состоянием и перспективами космической энергетики, динамикой событий в России и в мире, с содержанием научных докладов, статей, монографий, диссертаций, проектных документаций и патентов. Журнал будет включен в перечень ВАК, что поможет нашим молодым ученым.

Уходят из жизни корифеи космической энергетики (Иосифьян, Скребушевский, Лидоренко, Ванке и другие первопроходцы). Сохранить для молодого поколения имена и достижения пионеров космической энергетики – тоже важная задача.

В космической отрасли издаются более 10 научных и информационных журналов, но тематически все они чрезвычайно перегружены, поэтому журнал "Космическая энергетика" должен быть отдельным специализированным изданием.

Резолюции руководителя Роскосмоса на предложение об издании журнала косвенно свидетельствуют о его положительном отношении, но чиновники, которым адресуется наше предложение для исполнения, демонстрируют непонимание роли журнала и отказывают в финансовой поддержке такого издания. Возможно, консолидация предприятий, занимающихся научно-практической космической энергетикой (РКК Энергия им. Королёва, НПО им. Лавочкина, ЦНИИмаш, НПО Квант, ИЦ им. Келдыша, НПК Альтернативная Энергетика, НПП ВНИИЭМ и др., всего 25-30 предприятий), позволит осуществить этот проект.

Россия и впредь должна оставаться космической державой, а космическая энергетика неотъемлемая часть космической техники. Дальнейшее развитие космонавтики потребует мощности космических энергоустановок мегаваттных уровней, а научный журнал "Космическая энергетика" будет отражать это развитие.

**КОРРЕКТИРУЮЩАЯ ДВИГАТЕЛЬНАЯ УСТАНОВКА МАЛОГО  
КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА ДИСТАНЦИОННОГО  
ЗОНДИРОВАНИЯ «КАНОПУС-В»**

**А.В. Горбунов, В.П. Ходненко, А.В. Хромов<sup>1</sup>,  
В.М. Мурашко, А.И. Корякин, В.С. Жосан, Г.С. Грихин<sup>2</sup>,  
В.Н. Галайко, Н.М. Катасонов<sup>3</sup>,  
(1 - ФГУП «НПП ВНИИЭМ»  
2 - ФГУП ОКБ «Факел»  
3 - ОАО НПЦ «Полюс»)**

Рассмотрено назначение и область применения перспективного космического комплекса оперативного мониторинга техногенных и природных чрезвычайных ситуаций «Канопус-В».

Орбитальная группировка (ОГ) состоит из двух КА «Канопус-В», находящихся в одной плоскости и разведенных по фазе на 180°.

Для ОГ на солнечно-синхронной орбите высотой 510 км суммарный импульс тяги корректирующей двигательной установки (КДУ) КА «Канопус-В» составляет 40 кНс для семилетнего срока активного существования.

Назначение КДУ КА «Канопус-В»:

- начальная коррекция ошибок выведения КА на орбиту;
- формирование орбитальной группировки КА с разведением аппаратов по фазе на  $\phi=180^\circ$ ;
- текущая коррекция для компенсации тормозящего воздействия атмосферы;
- текущая коррекция, связанная с поддержанием углового расположения КА по аргументу широты.

Рассмотрены различные варианты исполнения КДУ как российских, так и зарубежных фирм.

Как наиболее приемлемы и для использования на КА «Канопус-В» в составе КДУ выбран стационарный плазменный двигатель СПД-50 разработки ОКБ «Факел» (г. Калининград обл.)

Приведены состав и основные характеристики КДУ.

Дано описание функциональной схемы КДУ, включающей два двигателя СПД-50 (основной и резервный), два модуля газораспределения МГР-50 (основной и резервный), блок подачи ксенона БПК, содержащий основную и резервную ветви подачи ксенона в МГР-50, блок хранения ксенона БХК, обеспечивающий хранение запаса ксенона и его подачу в БПК; систему преобразования и управления СПУ-КВ, обеспечивающую

электропитание и управление блоками КДУ (разработки ОАО НПЦ «Полюс», г. Томск).

Представлена структурная схема СПУ-КВ.

В основу СПУ-КВ положена система запуска и электропитания с многоканальным преобразователем напряжения и общей схемой управления на основе ШИМ-контроллера. Наряду с согласованием электропитания потребителей электроэнергии КДУ СПУ-КВ осуществляет прием и исполнение 22 команд управления, формирование и выдачу аналоговой (10) и сигнальной (6) телеметрической информации.

**АБЛЯЦИОННЫЙ ИМПУЛЬСНЫЙ ПЛАЗМЕННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ С  
РАЗДЕЛЁННЫМ МЕХАНИЗМОМ ИОНИЗАЦИИ И УСКОРЕНИЯ  
РАБОЧЕГО ТЕЛА**

*Богатый А. В., Дьяконов Г. А., Нечаев И. Л.*

*(Научно-исследовательский институт прикладной механики и  
электродинамики)*

Освоение космического пространства с каждым годом становится всё более востребовано для обеспечения различных человеческих потребностей. В связи с чем возникает необходимость в новых космических аппаратах (КА), оснащённых современными и высокоэффективными двигательными установками. Для небольших КА (до 200 кг) наиболее целесообразно применение АИПД так как он имеет малую массу и высокую надёжность.

Наибольшее распространение в настоящее время имеют АИПД одноступенчатой схемы (коаксиальные и рельсотронные). Ускорение плазменного потока в них осуществляется газодинамической и электромагнитной силами. У этих двигателей в одном разрядном контуре совмещены дозирующие и ускоряющие функции, однако такое устройство не позволяет существенно повысить какой-либо из параметров АИПД, не ухудшив остальные.

Альтернативой одноступенчатой схеме двигателя является двухступенчатая. Раздельная работа дозирующего и ускоряющего разрядных контуров открывает возможности для регулирования и повышения тяговых и удельных характеристик, таких как тяговая эффективность и удельный импульс тяги.

При разработке двухступенчатого АИПД в известную схему двигателя были внесены изменения. Катод у разрядных контуров (дозирую-

щего и ускоряющего) сделали общим. В разрядном канале реализовали схему «канал в канале».

Созданная лабораторная модель двухступенчатого АИПД находится в стадии экспериментального исследования. Анализ полученных данных свидетельствует о повышении тяговой эффективности и удельного импульса тяги. В настоящее время основной проблемой является разделение стадий разрядного процесса.

Мы продолжаем работу по усовершенствованию двухступенчатого АИПД. Основная цель - создание прототипа лётного образца, для возможного последующего практического применения.

#### **МОДЕЛИРОВАНИЕ РАДИАЦИОННОГО ТЕПЛООБМЕНА МЕЖДУ ЭЛЕМЕНТАМИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГОУСТАНОВКИ КОСМИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ**

*В.В. Леонов*

*(МГТУ им. Н.Э. Баумана)*

*E-mail: lv-05@mail.ru*

Активное развитие проектов по созданию космических аппаратов и станций, оснащённых солнечными высокотемпературными энергоустановками различного назначения (солнечные и электрореактивные ракетные двигатели, солнечные печи и электростанции) обуславливает необходимость располагать достаточно достоверным и экономичным методом оценки и прогнозирования радиационных и энергетических характеристик зеркальных концентрирующих систем, являющихся неотъемлемой частью таких энергоустановок и в значительной степени определяющих их конфигурацию и характеристики.

Для определения характеристик зеркальных концентрирующих систем была разработана статистическая математическая модель радиационного теплообмена, построенная с использованием методов Монте-Карло. Эта модель позволяет учитывать пространственные и спектральные характеристики падающего и отраженного излучения, а также температуру, шероховатость и другие дефекты, характерные для отражающей поверхности.

Её программная реализация позволила моделировать распределение радиационных тепловых потоков в зеркальных системах произвольной геометрии с учётом переменных радиационных характеристик отражающих поверхностей и воздействия окружающей среды, определять индикатрисы отражения и поля температур, вычислять геометрии

ческие и энергетические характеристики элементов системы и производить их оптимизацию.

Возможность рассмотреть большое число альтернативных вариантов конструкции и компоновки высокотемпературных солнечных энергоустановок при математическом моделировании ещё на ранних стадиях проектирования приводит к созданию рациональной конструкции при обеспечении максимальной энергетической и массовой эффективности и снижению материальных затрат на её проектирование и отработку по сравнению с традиционными экспериментальными и полужэкспериментальными методами.

#### **МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА В ШАРОВЫХ ТЕПЛОЫДЕЛЯЮЩИХ ЭЛЕМЕНТАХ ПРИ КИПЕНИИ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ**

***Ф.В. Пелевин, А.В. Пономарев, В.В. Лозовецкий***

***(МГТУ им. Н.Э. Баумана)***

*E-mail: pelfv@rambler.ru*

Шаровые твэлы с топливом на основе микрочастиц с многослойным покрытием привлекают в последнее время внимание специалистов, занятых проектированием активных зон высокотемпературных ядерных реакторов космического и наземного назначения и водяных энергетических реакторов (ВВЭР). Такие твэлы обеспечивают удержание продуктов деления ядерного топлива до температуры 1600°C и выше, что позволяет получить на выходе из активных зон высокотемпературных газо-охлаждаемых реакторов газ с температурой 900°C и выше, а в ВВЭР, выполненных по одноконтурной схеме, перегретый пар сверхкритических параметров и увеличить КПД до 50%. Это в свою очередь снижает потребление энергии, вредную нагрузку на окружающую среду, способствующую возникновению «парникового эффекта» и глобальному изменению климата. Использование такой технологии тормозится недостатком данных, касающихся процессов теплообмена и гидродинамики в тепловыделяющих сборках с засыпкой шаровых твэлов; отсутствием расчетных зависимостей для описания этих процессов.

Представлены результаты экспериментальных исследований тепловых процессов в засыпках шаровых тепловыделяющих элементов применительно к активным зонам ядерных реакторов с шаровыми топливными тепловыделяющими элементами. Установлены пузырьковый и переходный режимы кипения в тепловыделяющих элементах. Полу-

чены критериальные зависимости, которые удовлетворительно описывают данные по теплоотдаче, соответственно, для областей пузырькового и переходного режимов кипения в шаровой засыпке.

Переход от пузырькового режима кипения к переходному режиму кипения происходит при определенных значениях удельного теплового потока и, соответственно, перегревах поверхности шаровых элементов, и сопровождается уменьшением коэффициента теплоотдачи.

**МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ВЫСОКОВОЛЬТНОГО  
ТЕРМОЭМИССИОННОГО ДИОДА СИСТЕМЫ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ТОКА  
КОСМИЧЕСКОЙ ЭНЕРГОДВИГАТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ**

*Е.В. Онуфриева, В.В. Онуфриев, А.Б. Ивашкин*

*(МГТУ им. Н.Э. Баумана)*

*E-mail: [onufryev@bmstu.ru](mailto:onufryev@bmstu.ru)*

Высоковольтный термоэмиссионный диод элемент системы преобразования тока для согласования электрических параметров ЭРДУ и источника энергии – термоэмиссионного реактора-преобразователя. Назначение таких диодов – выпрямление переменного напряжения 1-3 кВ, получаемого в преобразователе после повышающего трансформатора (это напряжение необходимо для функционирования ЭРД).

В этой связи эффективность проектирования высоковольтных термоэмиссионных диодов во многом зависит от адекватности моделирования его рабочего процесса в режиме обратного тока (когда в межэлектродном зазоре горит высоковольтный тлеющий разряд), обеспечивающего электрическую прочность диода по отношению к зажиганию обратного дугового разряда (обратный пробой).

В работе проведено моделирование режима обратного тока в одномерном приближении. Рассмотрена система уравнений, описывающая разряд с учетом принятых допущений (неэмиттирующий анод, отсутствие ионизации в катодной области разряда). Полученная система уравнений решалась двумя способами: численно с использованием ЭВМ, аналитически с учетом упрощений исходных уравнений, не искажающих физики процесса.

Получены распределения поля, потенциала, температуры пара цезия в режиме обратного тока.

Рассмотрен вопрос с расчетом напряжения зажигания обратного дугового разряда (для случая неэмиттирующего отрицательного электрода, а также с учетом изменения его температуры). Обе модели рас-

считывались аналитически, с использованием данных экспериментов. Получены полуэмпирические зависимости для расчета напряжения зажигания обратного дугового разряда (обратного пробоя) в высоковольтном термоэмиссионном диоде.

На основе моделей показан механизм обеспечения электрической прочности к обратному дуговому пробую и выявлен критерий устойчивости высоковольтного тлеющего разряда в режиме обратного тока.

Проведено сравнение результатов аналитического и численного моделирования с экспериментальными, показавшее хорошее количественное совпадение.

На рис. 1 показаны результаты моделирования распределения поля в межэлектродном зазоре в режиме обратного тока.

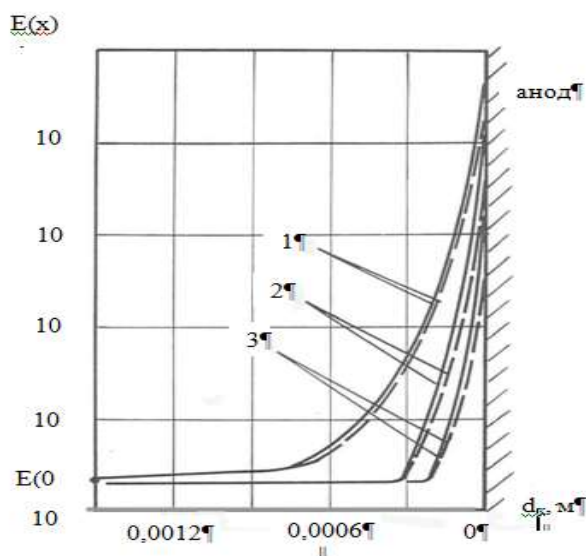


Рис. 1 Расчетное распределение электрического поля в режиме обратного тока: 1 –  $p_{Cs} = 1,33$  Па, 2 –  $p_{Cs} = 13,3$  Па, 3 –  $p_{Cs} = 26,6$  Па;  $E(0) = 3000$  В/м;

\_\_\_\_\_ -  $U_{обр} = 1200$  В, ----- -  $U_{обр} = 600$  В



**АНАЛИЗ АЧХ И ФЧХ СИСТЕМЫ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ТОКА КОСМИЧЕСКОЙ  
ЭНЕРГОДВИГАТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ**

*Е.В. Онуфриева, В.В. Онуфриев, А.Б. Ивашкин*

*(МГТУ им. Н.Э. Баумана)*

*E-mail: [onufryev@bmstu.ru](mailto:onufryev@bmstu.ru)*

В системах преобразования тока (СПТ) космических энергодвигательных установок (ЭДУ) перспективными вентилями рассматриваются термоэмиссионные вентили плазменной электроэнергетики: сеточные ключевые элементы (СКЭ) и высоковольтные плазменные термоэмиссионные диоды (ВПТД). Использование указанных термоэмиссионных вентиляей эффективно в условиях космических энергодвигательных установок в силу их высокой рабочей температуры ( $T = 700 - 1000 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ), способности работать в условиях вакуума (вне гермоконтейнеров), действия ионизирующих излучений и тепловых потоков высокой плотности. Система преобразования тока ЭДУ содержит нелинейные элементы, какими являются и термоэмиссионные вентили. Поэтому актуальным является вопрос устойчивой работы СКЭ и ВПТД в цепи с нагрузкой различной мощности и регулируемыми параметрами.

В работе была рассмотрена эквивалентная цепь, представленная на рис.1, включающая источник тока, термоэмиссионный вентиль и нагрузку:

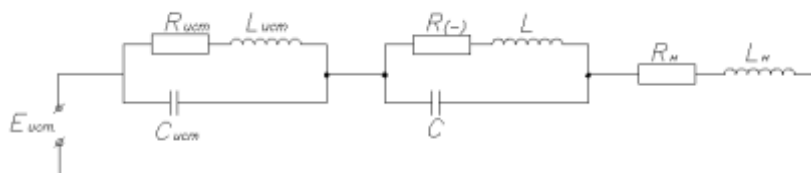


Рис.

Эта схема может быть описана следующим нелинейным уравнением:

$$\frac{d^2 i}{dt^2} + \frac{L_n + \left(\frac{C}{C_{uctm}} + 1\right) \cdot L + C \cdot R_{(-)} \cdot R_n}{L_n \cdot C \cdot R_{(-)}} \frac{di}{dt} + \frac{\left(\frac{C}{C_{uctm}} + 1\right) \cdot R_{(-)} + R_n}{L_n \cdot C \cdot R_{(-)}} (ai + bi^3) = \frac{E \cdot \cos \omega t}{L_n \cdot C \cdot R_{(-)}}$$

(1)

Рассмотрено влияние емкостно-индуктивных свойств источника (ТРП) и СПТ на характер изменения тока в электрической цепи.

Для различных значений параметров (емкость, индуктивность, активное сопротивление) вентиля, источника и нагрузки были получены амплитудно-частотные (АЧХ) и фазо-частотные (ФЧХ) характеристики и проведен их анализ.

На рис. 2. приведена характерная зависимость тока в цепи с учетом нелинейных эффектов. Вид уравнения при следующих параметрах цепи:

$$L_{нагр} = 10^{-9} \text{ Гн}, \quad L_{вент} = 10^{-5} \text{ Гн}, \quad C_{вент} = 10^{-6} \text{ Ф}, \\ C_{ист} = 10^{-4} \text{ Ф}, \quad R_{нагр} = 100 \text{ Ом}, \quad R_{(-)} = 0.01 \text{ Ом}, \quad E_{ист} = 150 \text{ В}, \\ a = 10, \quad b = 150$$

$$10^{-8} \frac{d^2 i}{dt^2} + \frac{di}{dt} + 0,1 \cdot i + 1,5 \cdot i^3 = \sin 5000t$$

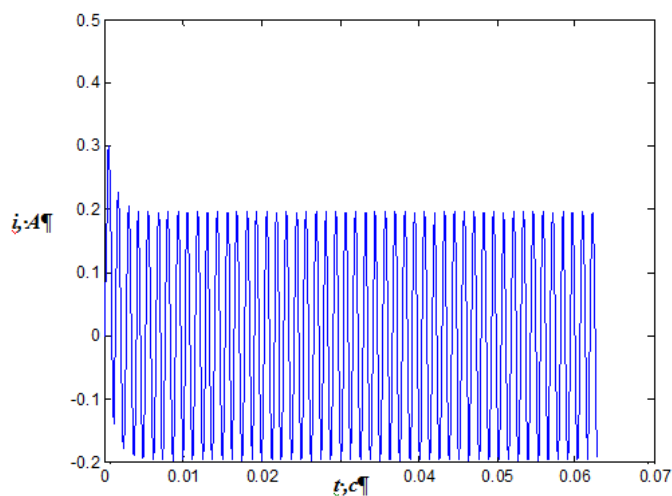


Рис. 2.

**ИЗГОТОВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОДОВ ИОС ИД МЕТОДОМ ИОННОГО ПРОШИВАНИЯ**

***А.В.Вебер, Е.Н.Казаков, А.И.Мозулкин, И.В.Никитиных,  
В.А.Обухов, С.А. Ситников, М.Е.Смирнова, С.А.Хартов  
(Московский авиационный институт (национальный исследова-  
тельский университет))***

Узел ионно-оптической системы (ИОС) является одним из основных элементов ионных двигателей (ИД), определяющих их выходные характеристики. Он состоит из двух или трех эквидистантных пластин – электродов, выполненных в виде сегментов сферы, густоперфорированных соосными отверстиями. Для обеспечения высокой эффективности двигателя отверстия в соседних электродах выполняются разного диаметра. Количество отверстий достигает, например, для 300 мм электрода – 15600, при этом требования к точности их изготовления очень высоки. Современные методы изготовления – электро-эрозией или лазерным прошиванием требуют значительных временных затрат.

Развитие ИД (в том числе и радиочастотных) ставит перед разработчиками задачу увеличения размеров двигателя и, следовательно, их электродов, переход на новые конструкции на основе углерод-углеродных композиционных материалов. Современные технологии изготовления этих деталей будут являться лимитирующим фактором при налаживании мелкосерийного производства двигателей.

Ранее в МАИ в середине 70-х была показана принципиальная возможность изготовления ускоряющего электрода, выполненного из меди, методом ионного прошивания. При этом процесс осуществлялся при работе двигателя с установкой медной пластины непосредственно в узел ИОС. Результаты данного исследования продемонстрировали образование в плоской пластине отверстий за приемлемые времена работы двигателя. Отверстия первоначально образовывались в центре электрода, а затем на периферии.

В настоящем докладе приводятся расчетные оценки параметров процесса ионного прошивания и результаты натурального эксперимента по изготовлению 100 миллиметрового электрода из углерод-углеродного материала. Эксперимент показал, что в отличие от меди за 100 часов были полностью сформированы в основном периферийные отверстия. Образование же отверстий в центре осталось незаконченным и за 150 часов. Представлен анализ полученных данных, результаты вспомога-

тельных исследований по проверке ряда гипотез и обсуждение возможности развития работ.

**ИСТОРИЯ СОЗДАНИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ  
КОСМИЧЕСКИХ СРЕДСТВ С ТЕРМОЭМИССИОННЫМИ ЯДЕРНЫМИ  
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ УСТАНОВКАМИ**

***Е.Г. Лянной, А.П. Ковалев, А.В. Романов, А.Ю. Павлов, Л.С. Бурыйлов,  
Т.А. Зевелева, А.Ю. Журавлев  
(ФГУП «КБ «Арсенал»)***

В 1970-х годах в космической технике сложилась ситуация, при которой имеющиеся возможности используемых космических солнечных энергетических установок на основе фотоэлектрических преобразователей не удовлетворяли требованиям перспективных полезных нагрузок. Решением этой проблемы в нашей стране стало создание технологии космических ядерных энергоустановок (ЯЭУ) реакторного типа с прямым термоэлектрическим, а впоследствии более эффективным термоэмиссионным преобразованием, разработчиком которых стало НПО "Красная Звезда". На основе этих энергоустановок КБ "Арсенал", возглавившим работы по разработке, эксплуатации и модернизации космических средств с ЯЭУ, в период с 1974 по 1988 годы было создано более 30 КА различного целевого назначения, в том числе КА радиолокационного наблюдения "УС-А", а также экспериментальные КА "Плазма-А". В 2012 году исполняется 25 лет с момента начала эксплуатации КА "Плазма-А" с термоэмиссионной ЯЭУ.

Главной задачей КА "Плазма-А" ("Космос-1818", 02.02.1987-24.06.1987, "Космос-1867", 10.07.1987-17.06.1988) было обеспечение летно-конструкторских испытаний ЯЭУ ТЭУ-5 "Тополь" ("Топаз-1") мощностью 5,5 кВт со встроенным в активную зону термоэмиссионным преобразователем, и эта задача была успешно выполнена. Испытания продемонстрировали высокую надежность всех систем КА (на КА "Космос-1867" срок активного существования превысил гарантийный ресурс в четыре раза), а также подтвердили возможность обеспечения требуемого уровня радиационной и ядерной безопасности на всех этапах наземной и летной эксплуатации. Одновременно с этим на КА "Плазма-А" единственных в Мире были успешно опробованы ключевые технологии транспортно-энергетического модуля на основе ЯЭУ и электроракетной двигательной установки, проведен целый ряд других научных и технологических экспериментов.

В ходе работ КБ "Арсенал" и НПО "Красная Звезда" с кооперацией приобрели уникальный опыт, связанный с особенностями разработки и безопасной эксплуатации сложных космических средств с ЯЭУ. В конце 1980-х годов эксплуатация КА с ЯЭУ была прекращена, в первую очередь по политическим причинам, хотя полученные результаты и анализ будущих задач свидетельствовали о перспективности космической ядерной энергетики.

В настоящее время ядерная энергетика вновь рассматривается ведущими космическими державами как наиболее перспективная технология для решения проблемы качественного повышения энергооборуженности космических средств.

Интенсивные работы по созданию универсальной космической платформы повышенной энергооборуженности «Плазма-2010» с термоэмиссионной установкой нового поколения мощностью до 35 кВт ведутся ФГУП «КБ «Арсенал» и ОАО «Красная Звезда» с кооперацией в период с 2004 года по настоящее время в рамках действующих НИР и в инициативном порядке. Проект ориентирован на максимальное использование имеющегося материально-технического задела и апробированные технические решения, что позволит обеспечить восстановление технологий создания и эксплуатации космических средств с ЯЭУ в ближайшие 10 лет с минимальными техническими рисками.

Возобновление и развитие технологии космической ядерной энергетики среднего уровня мощности послужит фундаментом для реализации перспективных задач в околоземном космическом пространстве и дальнем космосе в интересах социально-экономического развития страны, прикладной и фундаментальной науки!

#### **К ВОПРОСУ ВЫБОРА ТИПА БОРТОВЫХ АККУМУЛЯТОРНЫХ БАТАРЕЙ ДЛЯ ВНОВЬ ПРОЕКТИРУЕМЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ**

***В.В.Галкин, В.А.Попов***

***(ОАО «Сатурн»)***

*E-mail: [ikc@zit.kuban.ru](mailto:ikc@zit.kuban.ru)*

Темой доклада является сравнение никель-водородных (НВА) и литий-ионных аккумуляторов (ЛИА) и батарей на их основе (НВАБ, ЛИАБ) с целью оптимального выбора аккумуляторной батареи (АБ) в зависимости от типа орбиты космического аппарата (КА). В докладе рассматриваются высшие мировые достижения рассматриваемой области техники – НВАБ ОАО «Сатурн» и ЛИАБ фирмы SAFT.

По начальным удельным характеристикам ЛИАБ (100÷125 Вт·ч/кг) существенно превосходят НВАБ (55÷65 Вт·ч/кг). ОАО «Сатурн» разрабатываются ЛИАБ практически не уступающие по своим характеристикам батареям SAFT.

В части надежности и, особенно, ресурса и живучести НВАБ заметно превосходят ЛИАБ. Эти характеристики наиболее актуальны при эксплуатации КА на низкой околоземной орбите (НОО).

При всем многообразии сравнительных характеристик АБ определяющими критериями выбора АБ для эксплуатации в составе КА являются: 1) энергомассовые характеристики с учетом ресурса и 2) комплексные показатели надежности и живучести АБ.

Анализ современного уровня показывает, что предпочтительным выбором при эксплуатации КА на геостационарной орбите (ГСО) является ЛИАБ за счет существенного выигрыша в удельной энергии. Преимущества НВАБ в части живучести и надежности во многом компенсируются устойчивой связью с КА на ГСО.

При выборе типа АБ при эксплуатации КА на НОО с высокими требованиями по циклическому ресурсу выбор НВАБ в качестве вторичного источника питания системы электропитания КА является практически безусловным. НВАБ, при эксплуатации на НОО, превосходят ЛИАБ по всем параметрам, кроме необходимости в системе терморегулирования более высокой мощности. При этом по показателям живучести и надежности эти системы просто несопоставимы.

#### **ТИПАЖНЫЙ РЯД ЛИТИЙ-ИОННЫХ АККУМУЛЯТОРНЫХ БАТАРЕЙ ДЛЯ СРЕДСТВ ВЫВЕДЕНИЯ**

***В.М. Алашкин, Ю.Ю. Батраков, Б.И. Туманов, В.Г. Удальцов  
(ОАО «НПК «АльтЭн»)***

Традиционно, для электропитания систем управления (СУ) и телеметрического контроля (СТК) ракетносителей (РН), разгонных блоков (РБ) и космических аппаратов использовались аккумуляторные батареи (АБ) никель-кадмиевой (герметичные) и серебряно-цинковой электрохимических систем. Конструктивно такие батареи представляют собой прямоугольный контейнер с установленными в нём аккумуляторами призматической формы.

Новые требования к источникам питания современных средств выведения предполагают не только снижение массы батарей, но и упрощение процесса их обслуживания и подготовки перед стартом РН.

Литий-ионные аккумуляторные батареи (ЛИАБ) в отличие от никель-кадмиевых АБ имеют в 5-7 раз меньшую массу при той же энергоёмкости и в необходимых случаях могут быть подзаряжены без демонтажа с объекта. В отличие от серебряно – цинковых - не требуют длительной подготовки и определённой пространственной ориентации. Энергетические и ресурсные показатели литий-ионной системы позволяют адаптировать её для использования не только для РН и РБ, но и для перспективных космических аппаратов.

В настоящее время ракетно-космическая отрасль является одним из наиболее активных потребителей литий-ионных АБ.

Разработанный на основании технических требований к бортовым источникам питания РН и РБ типажный ряд ЛИАБ имеет в основе литий-ионный аккумулятор цилиндрической конструкции.

Использование тонкоплёночных электродов и рулонной конструкции реакторной части цилиндрического аккумулятора позволяет достигнуть на ЛИАБ высоких скоростей разряда, сопоставимых со скоростями разряда систем с водным электролитом. Выбор аккумулятора цилиндрической конструкции обусловлен необходимостью обеспечения функционирования ЛИАБ в широком диапазоне токовых нагрузок, включая импульсные. При этом обеспечивается унификация конструкции батарей для применения в широком диапазоне постоянных и импульсных токов нагрузки (СУ) и относительно небольших постоянных нагрузок (СТК).

Коробчатая конструкция с силовыми элементами в виде кассет (“трубных досок”), в цилиндрические ступенчатые проточки которых вставлены аккумуляторы, существенно уменьшила массу батарей.

Для набора необходимой ёмкости аккумуляторы в батарее соединены по схеме  $nP8s$ , где  $n$  – количество параллельно соединённых аккумуляторов ёмкостью  $C$ , необходимых для обеспечения требуемой ёмкости батареи  $n \cdot C$ .

Восемь параллельных групп аккумуляторов соединяются последовательно для обеспечения выходного напряжения батареи 27-32,5 В. Такая схема имеет более высокую надёжность, чем схема  $8SnP$  – параллельное соединение  $n$ -цепей по 8 последовательно соединённых аккумуляторов.

**ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ И ВРЕМЕНИ ХРАНЕНИЯ КОРОТКОРАЗРЯДНЫХ ЛИТИЙ-ИОННЫХ АККУМУЛЯТОРОВ НА ИХ ХАРАКТЕРИСТИКИ****В.М. Алашкин, С.Д. Севрук, Б.И. Туманов, В.Г. Удальцов****(ОАО "НПК "АльтЭн")**

Ранее были представлены результаты опытно-конструкторской работы по созданию облегчённых бортовых источников питания на основе литий-ионных аккумуляторов для ракетоносителя (РН) "Протон-М" [1] и первые результаты их опытной эксплуатации в составе РН [2]. В разработанных батареях 8Lion-15СУ и 8Lion-10Т в качестве комплектующих использованы серийно выпускаемые немецкой фирмой "GAIA" литий-ионные аккумуляторы UHP-341450 и HE-341450, как наиболее полно соответствующие условиям эксплуатации ракетной и авиационной техники.

В данной работе изучалась сохраняемость указанных аккумуляторов, т.е. влияние на их характеристики условий и времени хранения, а также исходной степени заряженности.

Хранение осуществлялось как в нормальных климатических условиях (температура 288-298 К (15-25°C), относительная влажность и атмосферное давление не регламентируются), так и при повышенной температуре 343 К (50°C). На хранение закладывались изделия, заряженные на 100%, на 75% и на 50%.

Количественной мерой сохраняемости является изменение напряжения разомкнутой цепи (НРЦ) и электрической ёмкости изделия за время хранения. Эти величины определялись из сравнения разрядных характеристик до и после хранения. Разрядные кривые снимались в гальваностатическом режиме. Разряд осуществлялся токами 0,6·С и 2·С, где С – номинальная ёмкость аккумулятора.

В результате проведенного исследования установлен характер изменения НРЦ во времени, а также величина и скорость снижения исходной ёмкости при хранении. Общее уменьшение ёмкости складывается из части восстанавливаемой при последующем заряде (обратимые потери) и части потерянной необратимо (необратимые потери). Доля обратимых потерь может быть определена только для исходно полностью заряженных аккумуляторов.

В зависимости от степени заряженности характер изменения НРЦ аккумулятора по времени различно. У исходно полностью заряженных элементов НРЦ монотонно уменьшается. При этом скорость изменения напряжения со временем также монотонно уменьшается. У исходно



частично разряженных аккумуляторов в первые несколько суток НРЦ увеличивается, и лишь в последствии начинает уменьшаться, т.е. временная зависимость НРЦ имеет максимум.

Необратимые потери ёмкости с увеличением времени хранения увеличиваются, а скорость изменения ёмкости со временем уменьшается.

В результате проделанной работы подтверждено, что частично разряженные аккумуляторы имеют лучшую сохраняемость, чем исходно полностью заряженные.

Рассмотрено представление разрядных характеристик в различных координатах: напряжение – время, напряжение – ёмкость, напряжение – относительная ёмкость. Показано, что в координатах напряжение – относительная ёмкость разрядная кривая мало зависит от технического состояния и разрядного тока аккумулятора, если в качестве масштаба выбрана его фактическая ёмкость на данном режиме разряда. Увеличение разрядного тока сказывается только в виде незначительного уменьшения наклона кривой.

---

1. Алашкин В.М., Кукушкин А.Н., Николенко П.И., Севрук С.Д., Туманов Б.И., Удальцов В.Г. Бортовые источники питания ракетносителя "Протон-М" с литий-ионными аккумуляторами // Актуальные проблемы российской космонавтики. Тр. XXXIV академических чтений по космонавтике (Москва, 26-29 января 2010 г.). – М.: комиссия РАН, 2010. - с. 91-92.

2. Алашкин В.М., Севрук С.Д., Туманов Б.И., Удальцов В.Г. Оценка реальных характеристик источников питания ракетносителя "Протон - М" в условиях недостатка телеметрической информации // Актуальные проблемы российской космонавтики. Тр. XXXV академических чтений по космонавтике (Москва, 25-28 января 2011 г.). – М.: комиссия РАН, 2011. - с. 108-109.

**ПОВЫШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ВОЗДУШНО-АЛЮМИНИЕВОГО ХИМИЧЕСКОГО ИСТОЧНИКА ТОКА С СОЛЕВЫМ ЭЛЕКТРОЛИТОМ**

*Н.С. Окорокова, А.А. Платонов, К.В. Пушкин, С.Д. Севрук,  
А.А. Фармаковская*

*(Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет))*

Решение задачи повышения эксплуатационных характеристик воздушно-алюминиевого (ВА) химического источника тока (ХИТ) с солевым электролитом проводилось путём модификации продукта реакции — гидроксида алюминия  $Al(OH)_3$  с помощью доступных, дешёвых и безвредных добавок в электролит. В качестве модификаторов-флокулянтов были исследованы полиакриламид (ПАА) с молекулярной массой  $(5,2-5,6) \cdot 10^6$  и сополимер метакриловой кислоты и диметилдиаллиламмонийхлорида (ВПС-406) в различных соотношениях исходных мономеров (25,60 и 84% метакриловой кислоты).

Для выявления наиболее эффективного модификатора и его оптимальной концентрации был использован метод измерения объёмов осадков после коагуляции, которые получали в градуированных трубках аппарата Укена. Эксперименты проводили на образцах гидроксида алюминия, полученных электрохимически в анодных полуэлементах ВА ХИТ.

Из сополимеров ВПС такой эффект дал сополимер, содержащий 84% метакриловой кислоты.

Сравнимое с лучшим ВПС модифицирующее и флокулирующее действие оказал на гидроксид алюминия и ПАА. Наибольший флокулирующий эффект наблюдался при концентрации ПАА от 0,01 до 0,1%.

С найденными оптимальными композициями флокулянтов были проведены сравнительные эксперименты на токовых режимах в стеклянных анодных полуэлементах при плотности тока  $100 \text{ А/м}^2$ , температуре 298 К и времени разряда 6÷8 час.

Эксперименты показали, что введение ПАВ в исходный солевой электролит приводит к визуально наблюдаемым изменениям характера осадков. Увеличивается их текучесть и пластичность. После прекращения работы полуэлементов модифицированные осадки очень быстро флокулировались, поверхность анодов легко отмывалась от них, гораздо легче, чем от обычных осадков гидроксида.

Фазовые состояния модифицированных образцов гидроксида алюминия, были определены на дифрактометре УРС-50ИМ с медным антикатодом. Установлено, что добавка ПАА к свежесозданному гидрогелю гидроксида алюминия привела к образованию мелкокристаллической фазы., в то время как свежесозданный гидроксид алюминия без добавки имел аморфную структуру. Был проведен также дифференциально-термографический анализ полученных образцов на дериватографе системы "Паулик-Паулин-Эрдей".

Были проведены сравнительные испытания полноразмерного элемента ВА ХИТ в чисто солевых исходных электролитах и электролитах с добавками коагулянтов. Все эксперименты проводились при комнатной температуре путём снятия разрядных характеристик при постоянной плотности тока разряда  $100 \text{ A/m}^2$ .

Результаты более чем 30 испытаний позволили сделать вывод, что введение исследованных добавок флокулянтов-модификаторов в солевой электролит практически не ухудшают электрохимические параметры ВА ХИТ и приводит к значительному улучшению их эксплуатационных характеристик, связанных с повторным запуском ХИТ. При этом осуществляется лёгкое извлечение анодов и их отмывка для повторного использования, отмывка внутренних полостей источника от продуктов реакции и перезаправка электролитом.

#### **УВЕЛИЧЕНИЕ СРОКА ЭКСПЛУАТАЦИИ АККУМУЛЯТОРОВ**

***В.В. Куринной***

***(Днепропетровский национальный университет)***

*E-mail: kvalera@ua.fm*

Ежегодно снижается потребление энергии аппаратурой космической техники, однако её загрузка и объём растут значительно быстрее. Это приводит к применению более мощных источников как первичного, так и вторичного питания. Рентабельные для космоса алгоритмы оптимальной зарядки аккумуляторов предполагают значительное использование вычислительных ресурсов.

Предлагается технология изготовления микропористых электродов, для получения большой плотности тока за счёт увеличения площади пластин. Но заряд постоянным током при контроле напряжения переведёт такую батарею, за несколько циклов, на режим активного использования лишь 10% ёмкости. Это вызвано накоплением пузырьков

газа на дне долин. Что провоцирует деградацию электродов из-за повышением температуры и увеличения внутреннего давления.

Результаты компьютерного моделирования, при предложенной технологии, побочных эффектов не выявили, количество циклов заряд-разряд увеличивается в 6.3 - 7.2 раза, по сравнению с классической методикой. Сущность технологий оптимального заряда заключается в прерывании заряда кратковременным разрядом средней длительности 5 мс на интервале в 1 с по заданным законам. Расчёты показывают, что эффективность заряда при этом увеличивается, а время заряда уменьшается. Неиспользованную часть энергии солнечной батареи необходимо перераспределить на другие аккумуляторы.

Контролировать режим заряда придётся по комплексу значений температуры, напряжения, давления и их первых двух производных. Все вычисления производятся численным методом. Это связано с тем, что экстремумы всех переменных параметров во время заряда не совпадают во времени и зависят от многих факторов.

Фирма Galaxy Power Inc. разработала и запатентовала подобный метод анализа кривой изменения напряжения с использованием цифрового сигнального процессора, а агентство космических исследований NASA провело интенсивное его исследование и установило более чем 10-кратное увеличение количества циклов заряда-разряда. Но на сегодня использование общедоступных алгоритмов и имеющихся вычислительных мощностей спутниковой аппаратуры, по моему мнению, более перспективно.

**ОБРАЗЦОВЫЕ МЕРЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ НИЗКИХ  
НОМИНАЛОВ НА СРЕДНИЕ И БОЛЬШИЕ ТОКИ,  
ШУНТЫ-ЭТАЛОНЫ НА ИХ ОСНОВЕ**

**А.Ф. Литвин, А.А. Будник  
(ФГУП «НПП ВНИИЭМ»)**

*E-mail: [vniiem@vniiem.ru](mailto:vniiem@vniiem.ru)*

В последнее время рядом предприятий РКП выполняется разработка транспортно-энергетического модуля (ТЭМ) с ядерной энергетической установкой мегаваттного класса для питания электроракетных двигательных систем и других рабочих модулей.

В работах ведущих российских школ - политехнические институты в гг. Пенза, Ульяновск, Томск – подчёркивается, что особые проблемы возникают при измерениях средних (до 300÷500 А) и больших (до

3000÷5000 А и выше) токов из-за отсутствия образцовых мер электрического сопротивления малого номинала (десятки микроом ÷ десятки миллиом), обеспечивающих приемлемую точность измерений ( $\approx 0,002 \div 0,005$  %) на средних и больших токах. Это тормозит разработку системы прецизионных шунтов, например, для проекта ТЭМ.

При этом основные проблемы связаны:

- с высокими погрешностями измерений сопротивлений низкого номинала современными эталонными вольтметрами (Fluke 8508A, Agilent 3458A и 34420A и др.). Необходимо разработать методы повышения точности измерений сопротивлений низкого номинала (коэффициентов преобразования шунтов) с использованием, например, автоматизированного термометрического моста «Супертермометр Fluke 1595A»;
- с недостаточной изученностью вольтамперных характеристик резистивных элементов (линейность, допустимые уходы для ОСИ 1-го, 2-го, 3-го разрядов) с использованием, например, мощного прецизионного источника-измерителя ВАР Keithley 2651A;
- с контактными явлениями на переходах медь-манганин-медь, в т.ч. связанными с термоЭДС при возникновении каких-либо дополнительных термоэлектрических пар (для пары медь-манганин  $\approx 1$  мкВ/°С);
- с температурными эффектами при повышении плотности тока и т.д.

Разработан комплексный подход к решению указанных измерительных задач. Это позволяет выработать конструктивные пути для создания системы многопредельных образцовых мер электрического сопротивления и шунтов на их базе 1-го, 2-го, 3-го разрядов низкого номинала (10 мкОм; 100 мкОм; 1 мОм; 10 мОм) на средние (20÷200÷500 А) и большие (200÷2000 ÷5000 А) номинальные токи.

#### **МИНИМИЗАЦИЯ ВЫХОДНОГО ИМПЕДАНСА СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ**

***Д.Ф. Дементьев***

***(Открытое акционерное общество***

***«Научно-производственный центр «Полус»)***

*E-mail: polus@online.tomsk.net*

Большинство систем электропитания (СЭП) космических аппаратов состоит из солнечных и аккумуляторных батарей, объединенных в си-

стему комплексом автоматики и стабилизации, преобразователи которого обеспечивают качество электрических характеристик СЭП.

Объединение батарей, преобразователей и потребителей в единый энергетический и конструктивный комплекс может сопровождаться потерей устойчивости и проблемами обеспечения электромагнитной совместимости. Избежать таких проблем можно на раннем этапе проектирования СЭП, если проводить исследование на основе сопоставления входных и выходных характеристик всех входящих в нее приборов. Современным частотным критерием нормирования устойчивости и кондуктивной электромагнитной совместимости является импеданс  $Z(\omega)$ . Стандартом питания Европейского космического агентства требование к импедансам СЭП и потребителей задается через их соотношение. Отраслевые стандарты отечественных предприятий-изготовителей спутников связи регламентируют схожие требования по качеству СЭП.

Для определения мер, обеспечивающих устойчивость и электромагнитную совместимость СЭП, в пакете программ OrCAD проведено исследование влияния возмущения по цепи нагрузки преобразователя постоянного напряжения с частотой преобразования 50 кГц на амплитудно-частотную характеристику его выходного импеданса в диапазоне частот 10 Гц – 150 кГц.

Снизить выходной импеданс преобразователя в зоне управления (диапазон частот от 10 Гц до 10 кГц) можно за счет быстрого действия системы управления и увеличения емкости выходного сглаживающего фильтра.

Показано, что для минимизации выходного импеданса в окрестности частоты преобразования и кратных частот целесообразно применять специальные устройства коррекции в цепи обратной связи и осуществлять многофазную работу преобразователей, входящих в состав СЭП.

#### **ЭТАПНОСТЬ СОЗДАНИЯ КОСМИЧЕСКОЙ СОЛНЕЧНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ**

***Г.Г. Райкунов, В.М. Мельников***  
**(ЦНИИМАШ)**

Эффективным путём решения проблем энергетического и экологического кризисов, а также проблемы управления погодой, является создание космических солнечных электростанций (КСЭС) для трансляции электроэнергии наземным потребителям и электроснабжения в

перспективе экологически вредных и энергоёмких производств в космосе.

В США кооперация в составе Локхид-Мартин, Боинг, JPL, Центра Маршалла, Центра Гленна, а также ряда университетов, планирует создать коммерческую КЭС гигаваттного уровня к 2016г. для открытия рынка «космического электричества». Китай намерен участвовать в этом рынке.

Группа японских корпораций во главе с Mitsubishi Corporation планирует построить аналогичную КЭС к 2025г. в рамках проекта Solarbird. Общая стоимость КЭС оценивается в 24 млрд. дол. Аварии сразу на 3-х атомных японских электростанциях в марте 2011г. инициировали рост внимания общественности и правительства к разработке КЭС не только в Японии, но и в других странах. В Корею и странах Евросоюза также разрабатываются различные аспекты создания КЭС.

Время и финансовые затраты, необходимые для создания КЭС гигаваттного класса, во многом определяются выбором общей схемы, элементной базой, наличием опыта создания ключевых элементов, научно-техническим заделом по ним, а также эффективностью поэтапного подхода к созданию КЭС. Поэтапность заключается в создании прототипов КЭС с последовательно возрастающей размерностью для подтверждения принятых решений и набора опыта по их реализации. Представляется целесообразным, как это принято в Японии, провести отработку сначала на Земле устройств на мощность 1-10 кВт, затем в космосе последовательно на 10 кВт, 100 кВт и 1-10 МВт с трансляцией энергии на Землю.

Предлагается Проект создания прототипа КЭС мощностью 100 кВт, использующий в качестве базового КА ТК «Прогресс», который в сочетании с МКС является уникальной космической лабораторией для отработки новой техники. Такая возможность у разработчиков КЭС в США и Японии отсутствует. Реализация проекта должна быть не позже 2016г. В этом случае отечественные разработки не будут отставать от зарубежных.

**АКТИВНАЯ ТЕПЛОВАЯ ЗАЩИТА КОСМИЧЕСКИХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ  
АППАРАТОВ, ВЫПОЛНЯЮЩИХ МИССИИ В АТМОСФЕРЕ ПЛАНЕТ,  
ВБЛИЗИ СОЛНЦА И ДРУГИХ КОСМИЧЕСКИХ ИСТОЧНИКОВ  
ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ**

***В.А. Керножицкий, А.В. Колычев***

***(Балтийский государственный технический университет  
«ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова)***

E-mail: [vakern@mail.ru](mailto:vakern@mail.ru), [miqom@mail.ru](mailto:miqom@mail.ru)

Для проведения сложных экспериментов на борту космических летательных аппаратов при вхождении в плотные слои атмосферы планет или вблизи Солнца и космических источников тепловой энергии можно использовать активную тепловую защиту на основе термоэлектронной эмиссии.

В данном случае предлагается осуществлять передачу тепловой энергии аэродинамического нагрева в атмосферах планет и Солнца, или энергии, поступающей от других Космических источников электронам в металлах, которые, таким образом, выполняют функции теплоносителя. За счет полученной таким способом тепловой энергии электроны выходят из металла и могут совершать полезную работу под нагрузкой, что приводит к возможности получения электроэнергии и обеспечения электропитанием различных бортовых систем ГЛА. Иными словами происходит электронное охлаждение оболочки части корпуса ГЛА и при этом на борту, за счет этого, генерируется электрическая энергия.

Таким образом, для КЛА нагреваемого, например, в атмосферах планет, появляется возможность постановки сложных энергоемких экспериментов при умеренном нагреве носовых поверхностей, как для фундаментальной науки, так и для прикладных исследований. Например, для отработки новых методов и средств воздействия на набегающий поток при спуске пилотируемых и автоматических аппаратов, а также выявления новых физических особенностей взаимодействия с атмосферой.

Новизна исследуемого способа тепловой защиты, в том числе мировая, а также перспективность выбранных направлений исследований и полученных результатов подтверждена патентом на изобретение № 2404087 "Термоэмиссионный способ тепловой защиты частей летательных аппаратов при их аэродинамическом нагреве", патентом на полезную модель № 95637 "Крыло гиперзвукового летательного аппарата в условиях его аэродинамического нагрева".



**ИССЛЕДОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМ  
УПРАВЛЕНИЯ НАВЕДЕНИЕМ ИК ПУЧКА В СИСТЕМАХ БЕСПРОВОДНОЙ  
ПЕРЕДАЧИ ЭНЕРГИИ**

**В.В. Капанов  
(ОАО «РКК Энергия»)**

Актуальность работы связана с важностью точного наведения в системах беспроводной передачи энергии, причем точного в энергетическом смысле. Одним из самых значимых параметров является коэффициент полезного действия, который напрямую зависит от качества наведения на мишень (приемник-преобразователь). Как можно большая часть пучка должна попадать на приемник. Также стоит отметить необходимость наземного тестирования всей системы передачи энергии, что несколько усложняет процесс управления наведением ИК пучка из-за влияния атмосферы.

Цель работы – исследование принципов и методов тестирования и создания качественной системы управления наведением ИК пучка в системах беспроводной передачи энергии.

На сегодняшний день существуют различные классификации систем наведения. Очень важно выбрать подходящий вариант и заниматься его оптимизацией под конкретные задачи. На данном этапе рассматривается оптическая автономная система наведения. Основа метода – сравнение текущего изображения с камеры с эталонным изображением приемника. В простейшем случае это сравнение происходит на плоскости наблюдения, совпадающей с плоскостью XOY прямоугольной абсолютной системой координат. Под плоскостью наблюдения будем понимать плоскость приемника-преобразователя.

Сравнение положения текущего и эталонного изображений производится с помощью функционала, который принимает экстремальное значение при совпадении положений этих изображений. В качестве устойчивых признаков (дескрипторов) корреляционный алгоритм использует прямые линии (характеризуемые координатами конечных точек, соотношением светлой и темной сторон и т.п.) и пятна (характеризуемые размерами, координатами, относительной плотностью по сравнению с фоном).

Допустим, есть  $q$ -мерное пространство признаков (координаты, форма, цвет и т.п.),  $X$  – характеризующий текущее изображение вектор,  $X^*$  – эталонное изображение. Наиболее частой формой оценки является

минимум нормы разности этих векторов. Для безразмерных признаков пользуются суммой квадратов разности компонент.

$$\Delta X = (X - X^*)^T (X - X^*)$$

Образ принадлежит к классу эталонов  $i$ , если для любого  $j$  из пространства эталонов верно

$$(X - X^*_i)^T (X - X^*_i) < (X - X^*_j)^T (X - X^*_j)$$

Измерения ведутся на фоне шумов, поэтому границы объектов размыты, оценки классов становятся неточными. Это значит, что распознавание носит вероятностный характер. Поэтому в качестве меры схожести текущего и эталонного изображений разумно использовать статистические характеристики. При определенных условиях наиболее удобной в этом смысле является взаимная корреляционная функция

$$B = (X^T X^*_i)$$

Будем искать сигнал известной формы  $As(t)$ , но неизвестной амплитуды  $A$  на фоне белого гауссовского шума. Пусть принимается колебание  $r=As(t)+n$ , пусть оно ограничено по ширине спектра приемника величиной  $\Delta F$  и имеет длительность  $T$ . Требуется сказать, присутствует ли в принимаемом сигнале полезная информация  $As(t)$  (событие  $\omega_1$ ) или принимаем его за шум (событие  $\omega_2$ ).

Условная плотность вероятности, связанная с событием  $\omega_1$ , может быть определена с помощью функционала правдоподобия, соответствующего случаю аддитивного белого шума

$$w\left(\frac{r}{\omega_1}, A\right) = c \exp\left[-\frac{1}{2N_0 \int_0^T (r - As)^2 dt}\right],$$

$$\langle n(t)n(t-\tau) \rangle = N\delta(\tau)$$

где  $c$  – нормирующий множитель.

Если известна априорная плотность вероятности амплитуды  $w_{pr}(A)$ , оптимальный байесов приемник вычисляет вероятность события так:

$$w\left(\frac{r}{\omega_1}\right) = \int_A w\left(\frac{r}{\omega_1}, A\right) w_{ps}(A) dA$$

Вычисляемое значение  $w\left(\frac{r}{\omega_1}\right)$  сравнивается с некоторым порогом. Если порог превышает, принимается решение о событии  $\omega_1$ , полезный сигнал есть, если нет – о событии  $\omega_2$ . Таким образом, процесс

распознавания требует предварительной оценки амплитуды, которую мы будем получать с приемника.

В рамках подготовки эксперимента по беспроводной передаче энергии с помощью ИК пучка была проведена серия лабораторных экспериментов, связанных с важным аспектом, управлением пучком излучения для наведения на мишень (приемник-преобразователь). В качестве фокусирующей оптической системы был выбран телескоп с электронным приводом CelestronNexStarSLT 130. Для создания программы автоматического наведения и удержания мишени на первом этапе необходимым было написание тестового программного комплекса, который позволил оценить возможности телескопа и выполнить оценочные эксперименты. Была проведена работа с приемником, с передатчиком, создана первая модель обратной связи. В последнем эксперименте, заключавшемся в передаче лазерного излучения, на 1,3 км происходило наведение пучка с использованием написанного программного комплекса, который успешно справился с задачей.

Финальный вариант системы в качестве входных данных будет получать положение источника, приемника, внешние условия, характеристики источника, характеристики приемника, положение ИК пучка в плоскости приемника. Эти данные вместе с характеристиками механической части системы должны использоваться для наведения, отслеживания цели (рис. 1).

Планируется постепенный переход к системе самонаведения, то есть связи источника и процессора, обеспечивающего наведение.

Выбор данного метода наведения отнюдь не окончательный, идут работы по изучению других способов и их применимости в беспроводной передаче энергии. В частности очень вероятно использование радиомаяков установленных в плоскости приемника, которые будут сообщать текущие координаты пучка (позволяет наводиться при плохой видимости или больших расстояниях, точность наведения улучшается в несколько раз).



Рис. 1. Общая схема процесса сбора данных и наведения

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ  
ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЭНЕРГИИ КАК ПРИЕМНИКА  
МОНОХРОМАТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ**

*В.А Домбровский, А. П. Смахтин, Р.К. Чуян<sup>1</sup>  
Солдатов В.И.<sup>2</sup>*

*(1 - Московский авиационный институт (национальный исследова-  
тельский университет)*

*2 - ГНЦ ФГУП «НПО Астрофизика»)*

Системы беспроводной передачи энергии с помощью сфокусированных пучков электромагнитного излучения в оптическом диапазоне волн весьма перспективны в условиях космического пространства [1]. Проведенные расчеты показывают, что достаточно эффективным приемником-преобразователем монохроматического излучения оптического диапазона волн в электрическую энергию в лазерных системах беспроводной передачи энергии может быть стандартный полупроводниковый фотоэлектрический преобразователь (ФЭП) [2-4]. Оценки пока-

зывают, что при использовании монохроматического излучения с энергией кванта излучения  $h\nu$  несколько превышающим ширину запрещенной зоны полупроводника  $\Delta E$  происходит существенный рост эффективности ФЭП в сравнении с режимом облучения солнечным светом.

В докладе приводятся результаты экспериментальных исследований рабочих характеристик ФЭП на основе кремния в зависимости от рабочей температуры и длины волны оптического монохроматического излучателя. При выборе частотного диапазона используемых в эксперименте излучателей учитывалось, что оптимальной с точки зрения получения максимальной эффективности преобразования энергии для кремниевых ФЭП является длина волны  $\lambda = 1,06$  мкм, превышение которой ведет к резкому снижению КПД практически до нуля. В работе были использованы маломощные излучатели со следующими характеристиками: лазер зеленого излучения с  $\lambda = 0,54$  мкм мощностью 20 мВт, лазер зеленого излучения с  $\lambda = 0,65$  мкм мощностью 28 мВт, лазер красного излучения с  $\lambda = 0,86$  мкм мощностью 2,1 мВт и светодиоды инфракрасного излучения с  $\lambda = 0,86$  мкм и  $\lambda = 0,94$  мкм мощностью 25 мВт. При этом, плотность мощности излучения на ФЭП составляла величину  $800 - 1000$  Вт/М<sup>2</sup>, что, по порядку величины, соответствовало требуемым расчетным значениям. Расчеты показали существенную зависимость характеристик ФЭП от его рабочей температуры. Однако при столь низких мощностях излучения используемых в эксперименте источниках оптического излучения температура ФЭП была равна комнатной температуре 300 °К. Поэтому была проведена серия экспериментов при повышенной за счет внешнего разогрева температуре ФЭП равной 350 °К.

Сравнение экспериментальных и расчетных значений КПД кремниевых ФЭП при монохроматическом облучении и фиксированной рабочей температуре показало их достаточно хорошее совпадение и, тем самым, подтвердило ожидаемый по расчетам значительный рост КПД более 30% при длинах волн, приближающихся к величине 1,06 мкм.

#### Литература

1. Гридин В.Н., Квасников Л.А. и др. Беспроводная энергетика как основа создания глобальных энергетических систем, Вестник Московского авиационного института, том 16, № 5, 2009, стр. 87-91.
2. Lendis G.A., Space Power by Ground-Based Laser Illumination, IEEE Aerospace & Electronics Systems Magazine, vol. 40, 1993, pp. 1893-1895.

3. Зверьков А.Н., Смахтин А.П., Чуюн Р.К., Характеристики фото-электрических преобразователей при монохроматическом облучении, XXXII академические чтения по космонавтике «Актуальные проблемы российской космонавтики», Москва, 2008 г., стр. 96 – 97.

4. Домбровский В.А, Зверьков А.Н., Смахтин А.П., Тугаенко В.Ю., Чуюн Р.К., Возможности экспериментального исследования систем беспроводной передачи энергии с помощью монохроматического излучения в космическом пространстве, XXXV академические чтения по космонавтике «Актуальные проблемы российской космонавтики», Москва, 2011 г., стр. 117 –119.

#### **ЗАРЯДКА АККУМУЛЯТОРОВ ПРИ ПОМОЩИ БАТАРЕИ ИЗ ДВУХ GaAs ФОТО ЭЛЕКТРОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ.**

*Савельев В.В.*

*(ОАО «РКК Энергия»)*

Идея о беспроводной передаче электроэнергии (БПЭэ) возникла у физиков и инженеров с самых первых шагов практической электротехники. В качестве примера можно рассмотреть БПЭэ при помощи лазерного излучения (ЛИ), но тогда возникает проблема невозможности или затруднения постоянного контакта ЛИ и фотоприемника. Поэтому целесообразно иметь возможность запастись электроэнергией, переданную таким способом, в аккумуляторных батареях (АБ).

Для зарядки обычной АБ типа АА никель-металлогидридного (NiMH) или никель-кадмиевого (NiCd) необходимо обеспечить следующие условия зарядки: ток заряда ( $I_{зар}$ ) порядка  $0.1 \div 1$  емкости аккумулятора (С), и напряжение порядка  $1.2 \div 1.5$ В. При работе GaAs фотоэлектропреобразователя (ФЭПа) без нагрузки напряжение фото ЭДС на нем составит порядка 1В. Создав батарею из двух последовательно соединенных ФЭП мы получим результирующее фото ЭДС порядка 2В, а изменяя освещенность ФЭПа мы можем подобрать оптимальные значения тока зарядки.

Целью одного из экспериментов было определить насколько эффективно происходит процесс заряда АБ нашей схемой. Для этого производим зарядку АБ в течение некоторого промежутка времени, снимая показания с амперметра и вольтметра, определяем какое количество электрической энергии поступило в АБ за это время, потом разряжаем АБ на известное сопротивление, выбранное таким образом, чтобы в начальные моменты времени ток заряда и разряда были равны. И точ-

но также определяем количество энергии отданной при разряде и производим их сравнение.

**ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОСНОВАНИЕ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ И ИЗЫСКАНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ДЛЯ СОЗДАНИЯ НАУЧНОЙ АППАРАТУРЫ ДЛЯ КЭ «ПЕЛИКАН» (БЕСПРОВОДНАЯ ПЕРЕДАЧА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ)**

**О.В. Заяц, И.С. Мацак  
(ОАО «РКК Энергия»)**

Один из путей улучшения технико-экономических показателей системы межорбитальных перевозок – использование в системе отдельно космического аппарата с двигательной установкой для перевозки грузов и космического аппарата для производства электроэнергии, и передавать электрическую энергию с космических электростанций межорбитальным буксирам с помощью направленного электромагнитного излучения в тракте. На сегодняшний день рассматривается два диапазона длин волн для беспроводной передачи электроэнергии: СВЧ- и ИК-диапазон. Современный уровень развития техники даёт немного большие КПД тракта передачи для СВЧ-диапазона. Однако, физические ограничения, связанные с дифракцией на антенне СВЧ-волны определяют основную техническую проблему использования этого диапазона длин волн – большие размеры передающей антенны, недостижимые в ближайшем будущем.

ИК-канал передачи энергии может быть осуществлён на существенно меньших размерах приёмника и передатчика излучения. Промышленностью освоен выпуск источников ИК-излучения с эффективностями порядка 75%. Эффективности специализированных приёмников для ИК-излучения имеют величины порядка 50%. Поэтому ИК-диапазон излучения является более приоритетным для использования в тракте беспроводной передачи энергии.

Для демонстрации осуществимости такого метода энергоснабжения космических кораблей предлагается космический эксперимент «Пеликан» по передаче лучистой энергии посредством полупроводникового ИК-лазера, находящегося на борту МКС (рис. 1), на солнечные батареи транспортного грузового космического корабля, выполнившим свои задачи по снабжению МКС и имеющем возможность «зависать» на данном расстоянии от станции для проведения экспериментов. Целью

эксперимента также является отработка работы компонентов системы и их последующая возможная модернизация, с целью применения такой системы для технологических космических модулей.



Рис. 1. Схема космического эксперимента «Пеликан»

Одно из применений такой системы передачи энергии заключается в энергопитании малых технологических модулей, на борту которых необходимо достижение как можно меньшей микрогравитации.

После отработки технических аспектов беспроводной передачи энергии между космическими аппаратами могут проводиться эксперименты по передаче энергии на Землю.

На экспериментальной базе, состоящей из инфракрасного полупроводникового лазера с КПД 50%, были проведены эксперименты по измерению влияния неравномерности засветки поверхности ФЭП на его эффективность. Результаты экспериментов показали, что при работе с плотностями падающего излучения до  $700 \text{ мВт/см}^2$ , неравномерность засветки поверхности ФЭП никак не влияет на его эффективность. При превышении этого значения, КПД единичного фотоэлемента падает, что объясняется тем, что контактная сетка не справляется с возрастающим потоком носителей зарядов, в результате чего возрастают тепловые потери.

Также были проведены экспериментальные исследования температурной зависимости КПД преобразования фотоэлементов. Было получено, что мощность, снимаемая с фотоэлемента в условиях пониженной температуры ( $\sim 3 \text{ }^\circ\text{C}$ ), больше мощности элемента при комнатной температуре. Выигрыш в КПД составляет порядка 6%.

Были проведены экспериментальные исследования стандартных Si и GaAs солнечных батарей космических кораблей в условиях облучения



инфракрасным лазерным излучением для выяснения выяснение следующих вопросов:

- можно ли и с какой эффективностью использовать стандартные СБ космического назначения в качестве приёмника-преобразователя лазерного излучения применительно к системе БПЭЭ;
- как влияет неравномерность засветки поверхности стандартной СБ космического назначения лазерным излучением на эффективность преобразования;
- каковы возможные пути оптимизации конструкции СБ для использования в системе БПЭЭ.

Проведённые эксперименты показали, что оптимальным вариантом засветки для исследуемой Si СБ является случай, когда пятно лазерного излучения вписано в область батареи. Для GaAs оптимальной засветкой является вариант, когда вся батарея находится в условиях освещённости. Но и для Si, и для GaAs СБ даже в оптимальных условиях засветки велики разного рода потери. То есть использование СБ КА для приёма лазерного излучения в космосе возможно, но эффективность такого вида передачи электроэнергии не очень велика: для Si СБ она составляет порядка 10%, для GaAs СБ – порядка 14%.

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК  
ИНФРАКРАСНОГО КАНАЛА ПЕРЕДАЧИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ ОТ  
КОСМИЧЕСКИХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК**

*О.В. Заяц, И.С. Мацак  
(ОАО «РКК Энергия»)*

Космическая энергетика, обеспечивая на первом этапе своего развития потребление электроэнергии в десятки ватт, достигла сегодня уровня десятков киловатт мощности на космических аппаратах, работающих на орбите 10-15 лет, а на МКС отрабатываются подходы к получению с помощью солнечной энергетике мощности в сотни киловатт. В 2009 году в России стартовал амбициозный проект по созданию космической ядерной энергоустановки (КЯУЭ) мегаваттного уровня. Расширение спектра решаемых в космосе задач потребует роста мощности космических энергоустановок до уровней в сотни киловатт – мегаватты и, как неизбежное следствие, может стать экономически оправданной передача электрической энергии от космических кораблей-электростанций к разветвленной сети летающих на разных орбитах космических буксиров, промышленных установок, работающих в неве-

сомости и прочих потребителей энергии. Энергетические установки могут быть реализованы, помимо КЯЭУ, в виде космических солнечных энергоустановок (КСЭУ). Вне зависимости от технологии, по которой будет реализована энергетическая установка, важнейшим вопросом остается система передачи энергии на другие аппараты. В качестве двух возможных технологий рассматриваются беспроводная передача электрической энергии (БПЭЭ) посредством СВЧ или лазерного излучения. Технология БПЭЭ с помощью лазерного излучения является более предпочтительной ввиду меньшего дифракционного предела расходимости, что делает возможным создание устройств передачи и приема компактными по сравнению с аналогами для создания СВЧ-канала.

Для реализации лазерного канала передачи энергии на большие расстояния важнейшей задачей является создание узконаправленного энергетического пучка. За последний год был проведен ряд экспериментальных и теоретических исследований, направленный на изучение проблемы, формулирование требований к системе формирования пучка и приемникам излучения.

В качестве источника монохроматического излучения использовалась линейка инфракрасных лазерных диодов, отличающихся высоким КПД (~50%). В качестве систем формирования пучка были использованы линзовый коллиматор и зеркальный телескоп по схеме Ньютона. Исследования проводились на расстояниях до 300 метров, которое можно было обеспечить в лаборатории на имеющемся оборудовании.

Для исследования геометрических и энергетических параметров пучка была разработана оригинальная методика. Были проведены измерения диаметра пучка по трассе (рис. 1) и распределения плотности (рис. 2) излучения по объему пучка.

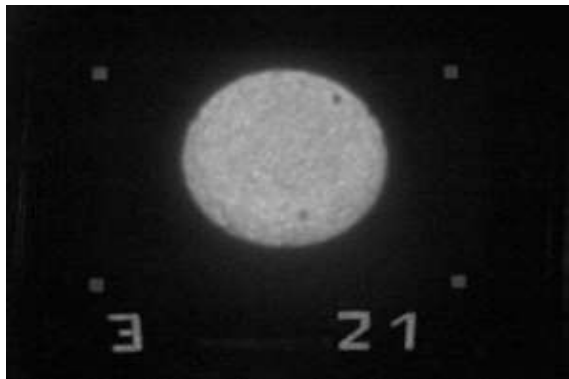


Рисунок 1 Фотография пучка

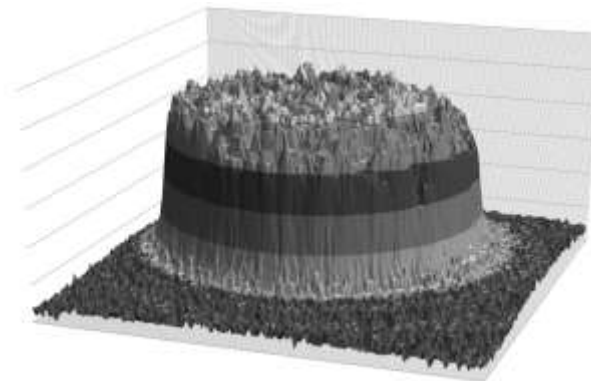


Рис. 2 Распределение энергии по сечению пучка

По экспериментальным данным была вычислена расходимость излучения и сделана оценка диаметра на расстоянии 1300 метров. Экспериментально полученное значение диаметра пучка на этом расстоянии совпало с расчетным в пределах погрешности.

На основе полученных оценочных расчетов и экспериментальных исследований были выбраны основные схемы реализации системы формирования пучка, и предложены технические решения, а также сформулированы требования к оптико-энергетическому макету, который будет служить прототипом для блока излучения при подготовке

демонстрационного эксперимента «Пеликан» по беспроводной передаче энергии между космическими аппаратами.

#### **РАЗРАБОТКА ВСЕНАПРАВЛЕННОГО ПРИЕМНИКА ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ**

***А.Е. Разуваев***  
**(НИЯУ МИФИ)**

В настоящее время одной из задач в разработке системы беспроводной передачи электрической энергии (БПЭЭ) в космическом пространстве является разработка всенаправленного приемника энергии лазерного излучения.

Основным требованием к приемнику является отсутствие подвижных элементов конструкции, т.к. одно из возможных применений системы БПЭЭ - снабжение энергией автономного космического аппарата, предназначенного для научных исследований, при которых необходим минимальный уровень микрогравитации.

В качестве источника энергии рассматривается параллельный пучок лазерного излучения с круглым профилем. Для приема лазерного излучения используются плоские фотоэлектрические преобразователи (ФЭП) прямоугольной формы. Особенностью таких приемников является нестабильность эффективности приема излучения такими ФЭП под различными углами падения вследствие отражения излучения от защитного стеклянного слоя, обязательно наносимого на ФЭП. Даже при падении света на стекло под прямым углом потери на отражение составляют около 8%. На стекло возможно нанесение антиотражающих покрытий. Было рассчитано, что антиотражающее покрытие делает потери пренебрежимо малыми лишь при небольших (до 50°) углах падения.

Из требования отсутствия подвижных элементов конструкции приемника следует симметричность его конструкции для максимальной стабильности приема энергии под всевозможными углами падения излучения. Наиболее симметричной фигурой является шар, поэтому стоит рассмотреть формы, приближенные к сферической. На деле они окажутся некоторыми многогранниками, поэтому рассмотрим несколько различных правильных и неправильных многогранников.

Проще всего сделать всенаправленный приемник в форме куба, т.к. его грани можно наиболее эффективно заполнить плоскими прямоугольными ФЭП, и изготовление основы для заполнения ФЭП кубиче-

ской поверхности не представляет технологических сложностей. Недостаток конструкции состоит в необходимости точного наведения луча именно на ту грань куба, которая наиболее развернута к источнику для минимизации потерь на отражение от ФЭП, т.к. двугранный угол у куба составляет  $90^\circ$ , и если на одну из граней луч падает под углом  $30^\circ$ , то на соседнюю он будет падать под углом не менее  $60^\circ$ , где потери на отражение будут составлять от 4%.

Рассмотрим другие многогранники - додекаэдр и икосаэдр. Двугранный угол у додекаэдра и икосаэдра значительно больше чем у куба -  $117^\circ$  и  $138^\circ$  соответственно. Поэтому, в случае полного заполнения ФЭП граней многогранника и точного наведения луча на центр многогранника, количество потерь на отражение может быть снижено. Однако, у данных форм есть серьезный недостаток: их грани имеют форму, отличную от прямоугольника, а промышленностью выпускаются именно прямоугольные ФЭП, и возникают сложности с заполнением граней данных фигур. При небольших размерах приемника, таких, что на грани помещаются без наложений не более 4х прямоугольных ФЭП, эффективность заполнения как правильного треугольника, так и правильного пятиугольника составляет менее 60%. Отсюда вытекают либо большие энергетические потери, либо серьезное увеличение стоимости конструкции, связанное с увеличением необходимого количества ФЭП для заполнения непрямоугольных граней с наложением.

Единственный способ исправить столь низкую эффективность покрытия приемника ФЭП - заполнять поверхность шара прямоугольными ФЭП без привязки к граням правильного многогранника. При заполнении шара диаметром  $\sim 25-30$ см ФЭП размерами примерно 50-70мм можно добиться эффективности заполнения поверхности более 80% без наложения.

Недостатком как схем додекаэдра и икосаэдра, так и последней рассмотренной является сложность конструкции и необходимость изменения геометрии расположения ФЭП, их крепления, а также их схемы подключения при изготовлении приемника другого размеров для других экспериментов, или же при изменении геометрии самих ФЭП.

Для всех рассмотренных конструкций диаметр пучка излучения должен быть составлять не более 0.5 размера приемника, так, чтобы полностью помещаться на той зоне приемника, где наименьшей коэффициент отражения.

Из-за сложностей в наведении луча на куб и сложностей в полном заполнении ФЭП поверхностей других многогранников предлагается конструкция в форме 3х пересекающихся квадратных плоскостей, со всех сторон заполненных ФЭП (рис.1). При попадании света внутрь трехгранного угла, на одну из граней, отраженный от нее свет попадает на другую грань, что сводит потери на отражение к минимуму (менее 1%) даже при отсутствии антиотражающего покрытия на ФЭП. Квадратная форма граней позволяет эффективно заполнять их ФЭП, и изготовление основы для такого приемника не представляет больших технологических сложностей. Проблема точного наведения лазерного луча в центр трехгранного угла решается довольно просто - наведение происходит на светодиод, расположенный в центре каждого 3хгранного угла, что становится надежным способом за счет того, что из любой точки наблюдения будет виден только один центр 3хгранного угла, или же приемник будет развернут к источнику так, что луч будет падать на одну из 3х плоскостей перпендикулярно к ней.

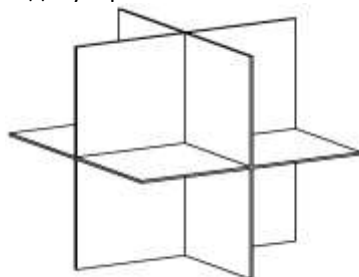


Рис.1