

УДК 520.6.05+53.09+544.636

Ю. А. Клименко¹, О. В. Семенив¹, А. В. Беспалова¹, Ю. В. Пруцко¹, Ю. А. Малетин², Н. Г. Стрижакова², С. А. Зелинский², С. А. Тычина², Д. М. Дробный², В. Б. Неймаш³, В. Н. Порошин³, В. Ю. Поварчук³

¹ Институт космических исследований Национальной академии наук Украины
та Державного космічного агентства України, Київ

² Институт сорбции та проблем ендоекологии Национальной академии наук Украины, Київ

³ Институт физики Национальной академии наук Украины, Київ

РАДИАЦИОННАЯ ВОСПРИИМЧИВОСТЬ СУПЕРКОНДЕНСАТОРОВ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИХ КОСМИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ

Рассмотрены перспективы использования суперконденсаторов в качестве элементов спутниковой системы энергообеспечения. Проведена серия лабораторных экспериментов по влиянию гамма- и электронного облучения на характеристики суперконденсаторов. Установлено, что суммарная эквивалентная доза радиации, способная ухудшить основные технические характеристики источника энергии, может быть накоплена на околоземных орбитах за время, которое значительно превышает время жизни самого спутника. Показано, что наиболее чувствительным к действию ионизирующей радиации элементом конструкции суперконденсаторов является электролит.

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время разработка и изготовление миниатюрных, легких и высокоэффективных изделий космической техники является одним из приоритетных направлений освоения космического пространства [13, 24]. По мнению специалистов, уже к концу этого десятилетия около 20 % космических задач будут решаться с помощью малых (500 — 1000 кг), мини- (100 — 500 кг), микро- (10 — 100 кг), нано- (1 — 10 кг), пико- (0.1 — 1 кг) и фемто- (до 100 г) спутников. Современные технологии по сути ограничивают возможности производства малогабаритного отказоустойчивого и высоконадежного оборудования для спутниковых систем. Необходимо искать новые подходы, ориентируясь на достижения современных технологий. Именно они сейчас предоставляют широкие возможности для проектирования и создания принципиально новых космических систем [8, 13, 16].

С ужесточением требований к новым космическим экспериментам и в связи с расширением круга задач, решаемых в космическом пространстве, все более возрастает потребность в увеличении мощности первичных и вторичных источников электропитания для космических аппаратов (КА). Повышение эффективности использования электроэнергии позволит увеличить мощность полезной нагрузки КА без увеличения его массы, либо, наоборот, сделает возможным сохранение структурных совершенств и функциональных возможностей „больших“ спутников на уровне их миниатюрных аналогов.

С точки зрения перспектив космического приборостроения широко применяемые ныне электрохимические источники питания — никель-кадмиевые, серебряно-цинковые, никель-металлгидридные и др. — имеют существенные недостатки (длительное время разряда/заряда, газовыделение, относительно высокая скорость саморазряда, использование специальных средств герметизации) и ряд экологических проблем, связанных с надежностью и эксплуатацией электрохимических источников тока на основе токсичных солей тяжелых металлов, газов и кис-

© Ю. А. КЛИМЕНКО, О. В. СЕМЕНИВ, А. В. БЕСПАЛОВА, Ю. В. ПРУЦКО, Ю. А. МАЛЕТИН, Н. Г. СТРИЖАКОВА, С. А. ЗЕЛИНСКИЙ, С. А. ТЫЧИНА, Д. М. ДРОБНЫЙ, В. Б. НЕЙМАШ, В. Н. ПОРОШИН, В. Ю. ПОВАРЧУК, 2013

лотных или щелочных электролитов. Активное внедрение в космическую отрасль литий-ионных и литий-полимерных технологий позволит обеспечить на 50 % более высокую энергетическую плотность, вдвое уменьшить массогабаритные характеристики и саморазряд батарей, но одновременно даст проигрыш в осуществимом количестве циклов «заряд — разряд» (до 5000 по сравнению с 20000 у никель-металлгидридных батарей), в уменьшении срока службы аккумулятора (до 2 лет), и сделает проблемным зарядку аккумуляторов при отрицательных температурах, либо их глубокую разрядку [21].

На сегодняшний день фактически нет предпосылок для создания компактных и высокоэффективных аккумуляторных источников питания, удовлетворяющих возросшим космическим требованиям ко времени их работы, числу циклов заряд/разряд, удельной энергии/мощности, температурной устойчивости, высокому к.п.д., низкому саморазряду, экологичности, радиационной стойкости и пр.

Альтернативой современным электрохимическим источникам служат новые типы высокоомощных накопителей электрической энергии — суперконденсаторы (СК), которые удачно занимают нишу между аккумуляторами и конденсаторами, сочетая в себе основополагающие преимущества обоих устройств, а именно высокую плотность запасаемой энергии первых и огромную мощность при импульсном разряде вторых [17].

Энергия в СК накапливается в результате разделения заряженных частиц в нанометровом двойном электрическом слое, образуемом на поверхности раздела нанопористого угольного электродного материала и электролита. Сочетание высокоразвитой удельной поверхности нанопористого углерода ($1000 \text{ м}^2/\text{г}$ и более) с нанометровой толщиной двойного слоя определяет огромную емкость СК — до $10 \text{ Ф}/\text{см}^3$. В отличие от аккумулятора, накопление и отдача электрической энергии в СК происходит не за счет электрохимических реакций и массопереноса через границу раздела, а только благодаря быстрым перемещениям (диффузии и миграции) подвижных ионов в жидком электролите. Поэтому суперконденсатор выдерживает на по-

рядки большее число полных циклов «заряд — разряд» без деградации материала (до миллиона циклов), демонстрирует предельно малое время выхода на необходимый уровень разряда (10—30 мкс), сверхвысокий уровень разрядной мощности (до $10 \text{ кВт}/\text{кг}$ и даже выше), имеет к. п. д. от 85 до 98 % и время жизни около 12—15 лет. Благодаря этим преимуществам СК имеет существенно меньший вес, чем электрохимические аккумуляторы аналогичной мощности, и к тому же температурный интервал их стабильной работы составляет от -50 до $+60^\circ \text{С}$.

Однако и суперконденсаторы не лишены недостатков. Основной из них — все еще низкая плотность запасаемой энергии ($3\text{—}5 \text{ Вт}\cdot\text{ч}/\text{кг}$), что в 20—30 раз уступает литий-ионным батареям. Другие (но менее существенные) недостатки — это быстрое падение напряжения в процессе разряда и сравнимая с электрохимическими источниками скорость саморазряда, до 15—30 % в месяц.

Совместное применение традиционных электрохимических источников тока и суперконденсаторов — т. н. комбинированные источники питания — дает своеобразный компромисс между двумя принципиально разными источниками энергии. При объединении со СК от батареи не требуется отдача больших импульсов мощности, их принимает на себя СК. Он также обеспечивает защиту от провалов напряжения и компенсирует пиковые нагрузки, что существенно продлевает жизнь электрохимических батарей. Именно комбинированные источники питания, по мнению специалистов, дают оптимальное соотношение преимуществ традиционных источников питания и СК.

Согласно маркетинговым исследованиям, мировой рынок СК растет со среднегодовым темпом 25 % и к концу 2017 г. достигнет рубежа в 2 млрд долларов. Промышленные и опытно-промышленные партии СК выпускаются такими фирмами, как Maxwell Technologies и Ioxus (США), Panasonic, Nippon Chemi-con и NEC Tokin (Япония), WIMA (Германия), Batscap (Франция), CapXX (Австралия), NESSCap, LS Cable, SK Energy, Korchip (Корея), ELTON, ECOND International (Москва), ЭЛИТ (Курск), «Юнаско-Украина» и другие.

Перспективам применения СК как составных элементов системы энергообеспечения будущих малых и сверхмалых космических аппаратов, а также оценке степени их радиационной устойчивости посвящена данная работа. Ранее применимость СК в качестве буферных источников питания для микроспутников была рассмотрена в работе [19], а устойчивость СК по отношению к умеренным дозам протонного и гамма-излучения была экспериментально установлена в работе [26]. Однако комплексный подход к поставленной проблеме до сих пор предпринят не был.

2. ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ СУПЕРКОНДЕНСАТОРОВ В КОСМИЧЕСКОЙ ОТРАСЛИ

Прежде чем очертить спектр возможных космических применений суперконденсаторов (СК), уместно упомянуть те народнохозяйственные отрасли, где СК уже используются, либо их использование имеет хорошие перспективы. В первую очередь, это электроэнергетика и связанные с ней системы бесперебойного энергообеспечения, компенсации пиковых нагрузок, накопления и выдачи потребителю электроэнергии определенной мощности, резервные и аварийные источники электропитания, фильтры и преобразователи тока и пр. Кроме энергетики, это радиоэлектронная и электротехническая промышленности, в особенности сложные интегрирующие элементы, возрастающая чувствительность которых требует их защищенности к провалам напряжения питающей сети или к ее кратковременным отключениям. В-третьих, это автономная бытовая техника, способная заряжаться за считанные секунды, и бытовая электроника: низкоинерционные резервные источники бесперебойного энергоснабжения (UPS) для портативных компьютеров, процессоров, цифровых фотоаппаратов, мобильных телефонов, электронных игрушек, плееров и изделий медико-биологического назначения (например слуховых аппаратов). В-четвертых, это промышленные импульсные источники питания для систем запуска двигателей внутреннего сгорания, сварочных аппаратов, сигнальных устройств, ветряных турбин и т. д. Перспективно

также применение СК в системах рекуперации энергии в электрических и гибридных транспортных средствах, лифтах, подъемных кранах и других электроподъемниках, малой авиации и электромобилях — там, где можно зарядить СК за счет энергии торможения движущегося или вращающегося технического аппарата.

Если рассматривать космические аппараты, то СК (вместе с аккумуляторами и солнечными батареями) могут обеспечить бесперебойное питание той части оборудования КА, где требуются значительные энергозатраты за сравнительно короткий промежуток времени. В первую очередь это системы управления аппаратом во время его запуска или движения по переходной орбите, механизмы запуска и остановки электрореактивных двигателей при изменении или коррекции орбиты КА, системы аварийной защиты и уничтожения ракет-носителей (здесь СК выступает в качестве детонатора пиротехнических блоков), системы активной ориентации и питания узлов стабилизации КА (раскручивание реакционных колес и пр.), системы разгрузки силовых гиродинов, средства развертки антенн и солнечных батарей, блоки резервного и аварийного хранения информации, резервное питание систем теплорегуляции, системы отделения микроспутников от ракеты-носителя (подрыв пиропатронов) и пр.

Как уже отмечалось, перспективными для космических применений считаются и комбинированные источники электропитания, состоящие из электрохимического аккумулятора и СК. Эти устройства способны увеличить срок службы источников питания (основных и резервных), существенно улучшить стабилизацию силы тока и его фильтрацию, а также обеспечить компенсацию пиковых нагрузок в критические моменты для бортовой электроники. Использование таких комбинированных источников, например в телеметрии, позволит существенно улучшить качество сигнала, передаваемого со спутника на Землю. При этом на восстановление сессии передачи потребуются существенно меньше времени, чем при использовании одной лишь электрохимической батареи, не защищенной от колебаний потребляемой мощности.

Комбинированные источники питания имеют большую перспективу для низкоорбитальных спутников. Их запуски планирует и Украина («Січ-2М», «Січ-3-О», «Січ-3-Р», «Попередження», «Інтербол-Прогноз»). Потребляемая аппаратурой мощность в таких спутниках является сравнительно низкой по сравнению с высокоорбитальными аппаратами (0.5—4 кВт против 15 кВт и более), а время их жизни составляет 5—8 лет вместо «стандартных» 10—12 лет. Причина сокращения срока службы связана с периодом обращения спутников на низких орбитах. Он составляет около 100—120 минут, и из-за частого переключения энергетической системы от солнечных батарей на аккумуляторы и обратно существенно снижается время жизни самого короткоживущего элемента спутника — электрохимического аккумулятора. Параллельное присоединение СК к аккумуляторной батарее даст возможность в полтора-два раза продлить срок службы батарей и избежать нежелательных для них глубоких циклов заряда/разряда и губительных всплесков по мощности.

Укажем еще на несколько перспективных применений СК, связанных с проблемой космического мусора. В настоящее время объём фрагментированного мусора — особенно на низких околоземных орбитах — настолько велик, что имеется серьёзный риск столкновения с ним космических аппаратов. Столкновения с техногенным мусором могут стать причиной повреждений поверхностей важных частей спутника и к его выходу из строя. Оставаясь на орбите, нефункционирующий спутник подвергается дальнейшей многократной фрагментации, что еще более увеличивает замусоренность орбиты. К настоящему времени ситуация с космическим мусором стала необратимой, и назрела необходимость в создании спутниковой системы мониторинга и быстрого реагирования на опасные фрагменты орбитального мусора с целью избежать возможных столкновений. В этой связи энергия суперконденсатора может обеспечить быстрый локальный маневр спутника для ухода с фатальной траектории. Другой допустимый вариант — уничтожение опасного мусора с помощью мощного лазера, импульс для возбуждения которого тоже может дать суперконденсатор.

Практика вывода спутников с орбиты по окончании срока их эксплуатации (на орбиты захоронения для геостационарных спутников и в плотные слои атмосферы для низкоорбитальных аппаратов), кроме наличия необходимого топлива, требует и запаса определенной мощности, необходимой для запуска реактивных двигателей космического аппарата. Однако к окончанию срока своей эксплуатации самый короткоживущий компонент спутника — аккумулятор — часто оказывается неспособным обеспечить необходимый импульс. В этом случае преимущество СК состоит в том, что он, даже будучи заряженным от «севшей» аккумуляторной батареи, способен обеспечить быстрое и эффективное питание для схода спутника с рабочей орбиты.

3. СУПЕРКОНДЕНСАТОР КАК ОБЪЕКТ РАДИАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ И МЕТОДИКА ЛАБОРАТОРНЫХ ИСПЫТАНИЙ

Вышеупомянутые перспективы применения СК в космической отрасли останутся невостребованными, если не оценить степень влияния космического пространства на работу СК. В особенности это касается степени его радиационной устойчивости [10, 12, 14]. Космическая радиация является многокомпонентной по своему составу, и каждый из компонентов по-разному воздействует на материалы, составляющие основу прибора [18]. Кроме того, действие космического ионизирующего излучения происходит на фоне воздействия других факторов космического пространства: магнитосферной плазмы, глубокого вакуума, невесомости, знакопеременной температуры и пр. Это еще более усложняет характер процессов, протекающих внутри материалов космической техники.

Физические механизмы влияния космической радиации на работу СК, помимо вида, интенсивности и энергии воздействующего излучения (о них говорится в Приложениях А и Б), зависит от принципа действия устройства и типа входящих в него материалов. Принцип действия СК основан на процессах заряда и разряда двойного электрического слоя, который образуется на межфазовой границе электрод/электролит [17]. Использование высокопористого углерода

в качестве электродного материала обеспечивает огромную емкость накопителя, а значит, и высокую — по сравнению с обычным конденсатором — удельную запасаемую энергию. Размер пор в углеродном материале должен быть доступен для электролитической системы и составлять около 2—3 нм при использовании органических электролитов. Именно такие поры способны разместить сольватированные квазисферические ионы с образованием в порах двойного электрического слоя. При больших размерах пор уменьшается площадь активной поверхности, что уменьшает емкость суперконденсатора, а при меньших размерах затрудняется проникновение в поры ионов электролита, окруженных молекулами растворителя.

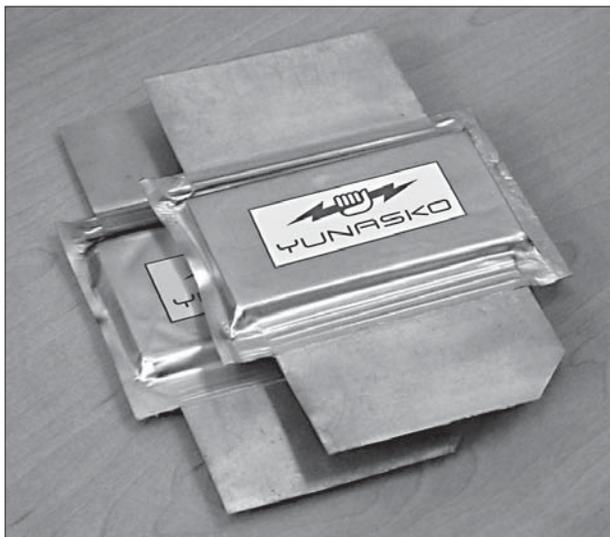
Кроме удельной энергии, запасаемой в порах нанопористого углерода, ключевой характеристикой СК — как и для других химических источников электропитания — является удельная мощность его разряда. Для обеспечения высокой мощности выдаваемого электрического импульса необходимо снижение внутреннего сопротивления источника, которое определяется главным образом сопротивлением электролита в пористой матрице электродного материала [22]. Именно за счет своего низкого внутреннего сопротивления СК способны выдавать огромную мощность, в десятки раз превышающую способность аккумуляторов.

Исходя из этого, основным объектом для радиационного исследования фактически являются наноуглеродные поры с находящимся внутри них электролитом. Поведение заполненных электролитом пор и, как следствие, функционирование СК под действием радиационной нагрузки является трудно прогнозируемым из-за отсутствия данных о воздействии радиации на подобного рода наноматериалы. Имеет смысл отметить лишь фундаментальный обзор [23], посвященный влиянию ионного и электронного облучений на наноструктурированные материалы, а также экспериментальную работу [26] по восприимчивости СК к протонному и гамма-излучению.

Интуитивно следует ожидать, что влияние радиации на составляющие СК должно существенно отличаться от влияния радиации на обыч-

ные твердые тела и жидкости. Но аналитические расчеты для подобной задачи являются слишком сложными из-за незнания базовых характеристик взаимодействия излучений с подобным веществом — линейных потерь энергии частиц в заполненном электролитом нанопористом углероде и длины пробега частиц в этом двухкомпонентном материале. Наличие нанопор приводит к тому, что процесс взаимодействия радиации с углеродными атомами приведет к образованию дефектной пары «вакансия на поверхности поры — выброшенный в пору атом», которая, в отличие от обычных материалов с ближним или дальним порядком, не сможет рекомбинировать даже при комнатных температурах [23]. Дополнительные сложности в изучении радиационного влияния обусловлены сравнительно быстрым «зарастанием» пор из-за образования новых ковалентных связей (sp , sp^2 или sp^3) между выброшенным атомом и пористой поверхностью, а также образованием новых каналов за счет вакансий, которые создаются на месте выброшенных атомов. Если первый фактор будет негативно влиять на емкость СК, то второй, наоборот, должен увеличить емкость СК за счет открытия новых пор, ранее недоступных для электролита. Степень радиационного влияния на работу СК также зависит от физико-химических свойств электролита, в частности от степени устойчивости электролитической системы по отношению к радиолитизу, химической активности электролита по отношению к образующимся в нем и на поверхности электрода частицам и пр.

Отсутствие теоретических данных о степени радиационной устойчивости СК приводит нас к необходимости экспериментальной проверки устойчивости СК по отношению к электронному и гамма-воздействию — основным компонентам, дающим вклад в радиационную обстановку внутри космического аппарата. Электронный поток внутри КА порождается одним из первичных источников радиации в околоземном пространстве — радиационными поясами Земли — и ослабляется с увеличением толщины корпуса космического аппарата. Гамма-поток внутри КА связан с тормозным излучением электронов, создаваемым корпусом аппарата. С увеличением



Суперконденсаторы компании «Юнаско-Украина» ёмкостью 500 Ф

толщины обшивки он может в тысячи раз превосходить электронный поток, служащий первопричиной гамма-излучения. Краткий обзор радиационных условий на околоземных орбитах вместе с оценкой уровня поглощенных доз на борту КА дается в Приложениях А и Б.

Лабораторные испытания образцов СК на предмет радиационной устойчивости по отношению к электронной и гамма-радиаций были проведены на базе соответствующего оборудования Института физики НАН Украины. Для испытаний были выбраны отечественные образцы СК, предоставленные фирмой «Юнаско-Украина». Продукты этой компании вполне конкурентоспособны, они сочетают относительную простоту изготовления устройства и отсутствие экологически опасных веществ. Их разработки (с уже протестированными первыми образцами) дают возможность обеспечить существенно более высокую (в 2–3 раза) удельную мощность устройства, чем зарубежные аналоги сходной массы, не уменьшая при этом удельную энергию СК. Это было подтверждено результатами сравнительных испытаний, проведенных в Институте транспортных исследований (г. Дэвис, США), а также в компании JME Inc. (г. Кливленд, США).

Для анализа влияния гамма- и электронного облучения на характеристики и режимы работы

СК было изготовлено 17 макетов этих накопителей. Реальные СК представлены на рисунке, но испытания проводились на макетах в связи с простотой их изготовления и компактности.

Угольные электроды для макетов формировались методом вальцовки смеси коммерчески доступного угольного порошка UP50F (производства компании Kuragay, Япония) с тефлоновой суспензией в качестве связующего. Толщина электродов составляла 0.1 мм. Полученный таким образом угольный электрод с линейными размерами 3 × 5 см ламинировали на поверхность алюминиевой фольги, которая выполняла роль коллектора тока. Изготовленные электроды сушили в вакууме при 220 °С, после чего их перемещали в сухой бокс с атмосферой аргона, где завершали изготовление макетов СК. Макет включал пару угольных электродов, нанесенных на коллекторы тока и разделенных сепаратором. Эту систему помещали между двумя слоями алюминиевой фольги, ламинированной полипропиленом, которая выполняла роль корпуса. После герметизации корпуса путем сварки полипропиленового слоя по его сторонам через специальный полипропиленовый штуцер электроды и сепаратор пропитывали раствором электролита. Электролит представлял собой 1.3М-раствор тетрафторбората триэтилметиламмония в ацетонитриле. Содержание воды в электролите не превышало 20 ppm. Такой электролит — а вместе с ним и макет СК — стабилен в температурном диапазоне от –50 до +70 °С. При более низкой температуре будет происходить кристаллизация соли за счет снижения растворимости или замерзания растворителя, а верхний предел указанного интервала определяется температурой кипения растворителя. В целом, вышеуказанный интервал покрывает интервал изменений температуры, наблюдаемый внутри космических аппаратов герметичного и негерметичного исполнений ($-20 < T < +40$ °С).

Ключевыми характеристиками для радиационного эксперимента являлись удельная емкость C (Ф/см³) и удельное внутреннее сопротивление R (Ом·см²) макетов СК, измеряемые до и после получения заданной дозы облучения. По первой характеристике судят об удельной энергии E ,

накапливаемой СК, а по второй — об удельной мощности P , выдаваемой накопителем ($E \propto C$ и $P \propto R^{-1}$).

В ходе радиационных экспериментов часть макетов СК облучалась в заряженном состоянии, и такая же часть — в незаряженном. По крайней мере один образец всегда оставался в качестве контрольного. Облучение проводили при комнатной температуре. В отличие от работы [26], посвященной влиянию умеренного потока протонов и гамма-квантов на характеристики СК и устойчивости СК в этом диапазоне, изучаемые нами дозы облучения на несколько порядков превосходят совокупную дозу, накапливаемую за весь период функционирования космического аппарата. Выбор в пользу таких больших интенсивностей обусловлен как высокими требованиями к устройствам аэрокосмического базирования, так и неопределенностью характеристик взаимодействия радиоактивного излучения с материалами, составляющими СК. Напомним, что для расчета приобретенных доз за испытуемый материал часто принимают кристаллический кремний, а приобретенная доза в других материалах, особенно тех, которые имеют твердые и жидкие компоненты, может существенно отличаться от «стандартно» рассчитываемой.

4. ВЛИЯНИЕ ГАММА- И ЭЛЕКТРОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ СУПЕРКОНДЕНСАТОРА

Эксперименты по гамма-облучению. В качестве источника излучения использовалась изотопная гамма-установка, содержащая кобальт-60. Суммарная активность радиоактивного источника составляла 450 Кюри, и это обеспечивало интенсивность гамма-потока 17 рад/с в камере облучения. Исследуемые макеты помещали в рабочую камеру транспортного штока, который автоматически доставлял их в камеру облучения, выдерживал их там определенное время для набора заданной дозы, а затем поднимал наружу. Процедуру облучения повторяли несколько раз для получения дозовых зависимостей измеряемых параметров.

Для тестирования параметров СК было изготовлено 11 одинаковых образцов. Один из них

оставался в качестве контрольного, а оставшиеся 10 разделялись на две равные группы: пять макетов облучались в заряженном состоянии ($U = 2.2$ В), а остальные пять — в разряженном ($U = 0.5$ В). Было проведено четыре серии облучения, суммарные дозы в которых составляли 100, 1000, 2000, и 4000 крад. Доза в 100 крад соответствовала верхнему пределу радиационных измерений, проведенных в работе [25], установившей факт радиационной устойчивости СК вплоть до эту границу.

Параметры, которые контролировались после каждой серии: усредненные значения емкости C и сопротивления R для каждой из трех групп макетов: заряженных, незаряженных и контрольной. Также анализировались относительные изменения этих параметров по отношению к первоначальным значениям: $\varepsilon_C = \frac{C - C_0}{C_0} \cdot 100\%$ и $\varepsilon_R = \frac{R - R_0}{R_0} \cdot 100\%$. В этих выражениях C_0 и R_0 — значения удельной емкости и сопротивления до радиационного облучения [20, 25].

Табл. 1 иллюстрирует динамику поведения емкости и сопротивления СК после каждой серии облучения гамма-квантами. Облученные СК — как заряженные, так и незаряженные — демонстрируют постепенное уменьшение удельной емкости и увеличение внутреннего сопротивления. Изменения емкости практически не превышают соответствующие изменения для контрольного необлученного образца, а изменения сопротивления, хотя и выше для облучаемых образцов, тем не менее остаются в допустимых международных стандартах пределах (+100 %).

Если сравнивать поведение заряженных и незаряженных СК, то можно увидеть, что степень влияния гамма-радиации на характеристики СК практически не зависит от накопленного внутри него заряда. А после сравнения характеристик облучаемых образцов с контрольным несложно сделать вывод, что даже высокие дозы гамма-облучения не способны существенно изменить емкость СК.

Несколько иная ситуация наблюдается с удельным внутренним сопротивлением СК. Относительные сопротивления облучаемых макетов, хотя и остаются в допустимых пределах,

как отмечалось выше, демонстрируют более уверенное увеличение по сравнению с контрольным, необлучаемым макетом. Поскольку сопротивление СК фактически определяется сопротивлением электролита в порах угольного электродного материала, то из этого следует, что большие дозы гамма-облучения способны вызывать химические превращения в электролите и на поверхности электрода, например вследствие радиолитического электролиза и взаимодействия продуктов радиолитического электролиза с поверхностью угля.

Также имеет смысл оценить, за какой период времени спутниковый СК способен накопить указанные выше дозы. В Приложении Б систематизированы сведения, из которых можно заключить, что общая поглощенная доза за обшивкой КА (включая гамма-вклад, создаваемый торможением релятивистских электронов внутри обшивки) составит около 2, 100 или 30 крад в год, если орбита спутника соответственно является низкой, высокой или геостационарной. Принимая во внимание максимальное время жизни спутника в 20 лет, следует заключить, что максимально возможная накопленная доза в СК никогда не сможет превысить 2000 крад. Поэтому, основываясь на представленных выше результатах, можно сделать вывод, что спутниковые СК практически не подвержены влиянию космической гамма-радиации.

Эксперименты по электронному облучению.

Для оценки влияния падающего электронного потока на характеристики и режимы работы СК было проведено облучение макетов СК релятивистскими электронами с энергией 1 МэВ. Облучение проводили с помощью линейного ускорителя электронов АРГУС, который обеспечивал интенсивность пучка до 10 мкА. Для проведения эксперимента было изготовлено шесть макетов суперконденсаторов. Четыре из них подвергались облучению (по два в заряженном и разряженном состояниях), а остальные два оставались как контрольные. За время лабораторного облучения полная интенсивность электронного потока составляла 10^{16} эл/см². Чтобы сравнить это значение с суммарными потоками на космических орбитах, достаточно воспользоваться данными из Приложения Б этой работы. На низких орбитах суммарный электронный поток за полное время жизни микроспутника составляет 10^{14} эл/см². Если же принять во внимание максимальную продолжительность жизни спутника на высоких и геостационарной орбите (20 лет), и используя данные о средней интенсивности потока на таких орбитах (10^6 см⁻²с⁻¹ и 10^3 см⁻²с⁻¹ соответственно), то несложно установить, что суммарный электронный поток, создаваемый за полное время жизни спутника на высоких и геостационарной орбите, соответственно составит величины порядка 10^{13} и 10^{10} см⁻². Приведенные оценки означают, что достигнутая в лабораторном эксперименте интегральная интенсивность электронного потока недостижима на спутниковых орбитах.

Изменение удельной емкости и удельного сопротивления макетов СК после облучения суммарным потоком в 10^{16} эл/см² представлено в табл. 2.

Таблица 1. Динамика изменения сопротивления и емкости суперконденсатора в результате гамма-облучения

Образцы	C, Ф/см ³ ; (ε _C , %)					R, Ом·см ² ; (ε _R , %)				
	Доза, крад:					Доза, крад:				
	0	100	1000	2000	4000	0	100	1000	2000	4000
Заряженные	17.1	15.96 (-6.7)	15.76 (-7.8)	15.1 (-11.7)	14.88 (-13)	1.14	1.25 (+9.7)	1.38 (+21.1)	1.85 (+62.3)	2.08 (+82.5)
Разряженные	16.72	15.94 (-4.7)	15.92 (-4.8)	15.8 (-5.5)	15.25 (-8.8)	0.96	1.12 (+16.7)	1.15 (+19.8)	1.33 (+38.5)	1.68 (+75)
Контрольный (разряженный)	17.1	15.7 (-8.2%)	15.6 (-8.8%)	15.6 (-8.8%)	15.6 (-8.8%)	0.92	0.99 (+7.6)	1.03 (+12)	1.1 (+19.6)	1.17 (+27.2)

Примечание. Периодичность снятия данных с контрольного образца такая же, что и для облучаемых образцов.

В отличие от гамма-излучения, электронное облучение оказывается более губительным для технических характеристик макетов СК. Но даже при высокой дозе облучения относительное падение емкости в макетах СК не превышает 50 %, что позволяет использовать их в качестве источника питания. К сожалению, этого нельзя сказать в отношении удельного сопротивления. Оно увеличивается в несколько раз, что приводит к пропорциональному уменьшению отдаваемой устройством мощности.

Косвенным фактором, свидетельствующим о наличии структурных изменений в макетах СК под влиянием больших доз радиации, служит изменение цвета электролита — в ходе радиационных испытаний он изменяется от бесцветного до желто-коричневого, а степень насыщенности цвета коррелирует с дозой электронного облучения. По всей видимости, такие изменения свидетельствуют о нарастающем радиоллизе электролита.

Важно также отметить, что даже после получения ударных доз облучения СК сохраняет свою функциональность и способен поддерживать новые циклы заряда/разряда.

5. ВЫВОДЫ

Основываясь на результатах экспериментов по гамма- и электронному облучению и материалах Приложений А и Б относительно радиационных условий на космических орбитах, можно сделать вывод о том, что за время жизни спутника источники электропитания на базе СК остаются ус-

тойчивыми к действию космической радиации. Из материалов, входящих в СК, наибольшей стабильностью обладает нанопористый углерод, отвечающий за емкость накопителя. Наиболее чувствительным к действию радиации является электролит, что отражается в увеличении внутреннего сопротивления СК под действием радиации.

Суммарная эквивалентная доза радиации, способная ухудшить основные технические характеристики СК (емкость и сопротивление, а значит и удельную плотность накопленной энергии, и удельную отдаваемую мощность) может быть накоплена на околоземных орбитах за время, которое на несколько порядков превышает время жизни спутника.

Суммируя вышеизложенное, можно сказать, что отечественные СК, изготавливаемые по технологии компании «Юнаско-Украина», имеют хорошие перспективы использования в высокоэффективных спутниковых системах электропитания. Еще больший интерес с точки зрения создания космических аккумуляторных источников питания могут представлять новые разработки этой компании — гибридные конденсаторы. Их электроды содержат компоненты как СК, так и литий-ионных батарей. В таких гибридах удельную энергию накопителя можно повысить практически на порядок. Оценить радиационную устойчивость таких источников еще предстоит.

Приложение А

ФАКТОРЫ КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА И РАДИАЦИОННЫЕ УСЛОВИЯ НА ОРБИТАХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

По экспертным оценкам, более половины отказов в работе оборудования космических аппаратов вызвано неблагоприятным влиянием факторов космического пространства (ФКП). На оборудование КА существенно влияют электромагнитная и корпускулярная радиация, магнитосферная плазма и плазма солнечного ветра, глубокий вакуум и метеорная пыль, температурные градиенты и пр. В результате таких воздействий в материалах и элементах конструкции КА развиваются разнообразные физико-химические процессы, накапливаются нежелательные отклонения и ошибки, что приводит к изменению (как правило, к ухудшению) их эксплуатационных характеристик [9, 19].

Таблица 2. Динамика изменения основных параметров суперконденсатора в ходе электронного облучения

Образцы	C, Ф/см ³ ; (ε _C , %)		R, Ом·см ² ; (ε _R , %)	
	I, эл/см ²		I, эл/см ²	
	0	10 ¹⁶	0	10 ¹⁶
Заряженные	16.8	10.25 (-39 %)	1.05	4.61 (+340 %)
Разряженные	14.75	13.65 (-7.5 %)	0.96	2.12 (+121 %)
Контрольные	16.35	14.85 (-9.2 %)	0.73	0.79 (+8.2 %)

Примечание. Периодичность снятия данных с контрольного образца такая же, что и для облучаемых образцов.

В условиях космического вакуума ($p = 10^{-8} \dots 10^{-12}$ Па) происходит уход воздуха из пористых материалов, испарение покрытий и смазок, скалывание частиц с трущихся поверхностей, потеря летучих компонентов в резинах и пластмассах и т. д. Метеорные потоки и микрометеоритная пыль дают эрозию корпуса КА, изменение оптических параметров защитных стекол и просветляющих покрытий, пробой оболочки герметических отсеков, деградацию солнечных батарей и пр. Термические удары из-за периодического попадания КА с освещенной части орбиты на затененную и наоборот (Т от -150 до $+100$ °С на корпусе КА), приводят к деформации теплоизолирующих покрытий, появлению трещин и разрушению контактных соединений, снижению сроков службы солнечных батарей, изменению рабочей температуры измерительных устройств, появлению термических напряжений в элементах конструкции, их старению и пр. Высокоскоростные плазменные потоки, являющиеся основной причиной нарушения энергоснабжения КА, дают электризацию корпуса КА, потерю мощности солнечных батарей, утечку электрического тока, искрение, коронный разряд и пр.

Однако главными причинами непредсказуемой и нештатной работы оборудования и приборов на борту КА являются процессы, порождаемые воздействием ионизирующего излучения на физико-химическую структуру вещества.

Основными источниками радиации на околоземных орбитах служат частицы радиационных поясов Земли, галактические и солнечные космические лучи, а также электромагнитное излучение Солнца. Частицы естественных радиационных поясов Земли (ЕРПЗ), в основном это электроны и протоны и ионы, захваченные геомагнитным полем, непрерывно распределены в диапазоне от десятков кэВ до сотен МэВ для протонов и до десятков МэВ для электронов. Галактические космические лучи (ГКЛ) представляют собой ускоренные до высоких энергий (10^8 — 10^{20} эВ) ядра химических элементов с преобладанием ядер водорода, гелия и других легких атомов. Под солнечными космическими лучами (СКЛ) понимают потоки заряженных частиц (в основном электроны и протоны) с энергией порядка 10^6 — 10^{10} эВ, испускаемые Солнцем за время магнитных бурь, когда уровень солнечной активности повышается в десятки и сотни раз. Активным Солнцем также генерируется электромагнитное излучение всех диапазонов — от метровых радиоволн до гамма-излучений [9]. Но обшивка космического аппарата экранирует все виды электромагнитного излучения, за исключением рентгеновского и гамма [13, 9].

Интенсивность первичных источников радиации в околоземном пространстве в значительной степени зависит от солнечной активности (СА). Между активностью Солнца и интенсивностью потоков ГКЛ наблюдается

антикорреляция, вызванная повышенным рассеянием галактических космических лучей небольших энергий на возмущениях межпланетного магнитного поля, переносимого плазмой солнечного ветра (т. н. форбуш-эффект). Вспышечный процесс на Солнце, порождаемый пере замыканием магнитных силовых линий, сопровождается выбросом СКЛ с интенсивностью, в несколько тысяч раз превосходящей интенсивность ГКЛ. Одновременно генерируются мощные потоки солнечного ветра, способные вызывать геомагнитные бури и усиливать интенсивности релятивистских электронов (их кинетическая энергия превосходит собственную энергию покоя $E = mc^2 = 0.511$ МэВ) в ЕРПЗ за счет погружения магнитосферы Земли в высокоскоростные потоки плазмы [1, 2, 4]. С возрастанием геомагнитного возмущения также усиливается интенсивность высыпания частиц из ЕРПЗ в районах северного и южного аврорального овала, а для сильных геомагнитных бурь интенсивные высыпания можно ожидать и на более низких широтах (50° и менее).

Кроме вышеназванных трех первичных составляющих космической радиации, иногда упоминают еще два типа первичного излучения: «аномальные космические лучи» (АКЛ) и горячую магнитосферную плазму [9]. Частицы АКЛ представляет собой однократно ионизованные атомы He, N, O, Ne и других элементов, захваченные геомагнитным полем. Они образуют дополнительный радиационный пояс с максимумом интенсивности на высотах 6...9 тыс. км над уровнем Земли в экваториальной плоскости. Плотность потока частиц в поясе сопоставима с плотностью потока ядер ГКЛ, а их характерная энергия составляет 10...15 МэВ/нуклон. Из-за специфики зарядового и энергетического распределений частиц АКЛ, а также их узкой локализации в околоземном пространстве данные частицы не представляют собой существенной радиационной опасности для космического аппарата [17].

Горячая магнитосферная плазма актуальна для высот в несколько десятков тысяч километров. Однако в полярных областях она проникает на высоты в сотни километров. Энергии электронов и ионов в плазме имеют порядок 0.1...100 кэВ, а плотность их потока составляет 10^7 ... 10^{10} см⁻²с⁻¹. Такие частицы способны оказывать радиационное воздействие лишь на приповерхностные слои обшивки КА (20...30 мкм). Значительно более опасным считается упомянутое выше накопление электрического заряда на поверхности аппарата, обусловленное воздействием магнитосферной плазмы [9].

Помимо первичных источников космической радиации, также необходимо учитывать и вторичные излучения. Прежде всего это ливни элементарных частиц, образованные при взаимодействии высокоэнергетичных ГКЛ (10^5 ГэВ и более) с веществом, а также тормозное электромагнитное излучение (рентгеновское и гамма-

кванты), генерируемое при взаимодействии релятивистских электронов с обшивкой КА или непосредственно с самим материалом.

Интенсивность заряженных частиц, испускаемых Солнцем за время интенсивных вспышек, по порядку величины равна $10^3 \dots 10^4 \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$ [9]. Характерные значения интенсивности потока ГКЛ и частиц ЕРПЗ составляют $10^{-3} \dots 1 \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$ и $10^4 \dots 10^8 \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$ соответственно, причем за время солнечной активности интенсивность потоков внутри ЕРПЗ увеличивается на один и даже два порядка. Потоки частиц ГКЛ обычно не учитываются при оценке поглощённых доз радиации, поскольку дозовый эффект от них на несколько порядков ниже, чем от частиц СКЛ и ЕРПЗ. (Но именно они дают доминирующий вклад в возникновение одиночных сбоев.) Поскольку в состав ГКЛ входят не только лёгкие, но и тяжёлые ядра химических элементов (с энергией 10^{10} Гэв и выше), то порождаемые ими ливни релятивистских частиц (более миллиарда частиц и более [4, 5]) способны привести к полному отказу работы любой системы космического аппарата, и особенно ее электроники.

Плотность радиационного потока на борту КА главным образом определяется близостью текущего положения космического аппарата к радиационным поясам как к наиболее активным источникам радиоактивного излучения. По современным данным [16] внутренний (протонный) ЕРПЗ в плоскости геомагнитного экватора располагается между высотами 1000 и 13000 км с центром около 3000 км, где наблюдается максимальная интенсивность протонов. Выше 13000 км и примерно до 65000 км располагается внешний РПЗ, обладающий максимальным потоком электронов на высотах 16500 км [14]. Потоки протонов и электронов во внутреннем поясе достаточно стабильны. Во время геомагнитных возмущений изменяется лишь пространственная структура электронного компонента внешнего ЕРПЗ [11].

Низкоорбитальные КА, часто используемые для спутников ДЗЗ и метеоспутников, в большей своей части находятся ниже центра первого РПЗ, диапазон высот составляет примерно 100 — 2000 км. В высоких широтах эти орбиты пересекают внутренний и внешний РПЗ. В области низких широт они могут попадать в зону внутреннего РПЗ при пролёте Южно-Атлантической (Бразильской) магнитной аномалии, где наблюдается существенное понижение нижней границы внутреннего радиационного пояса [4]. Как показано в работах [1, 4], космические аппараты на низких орбитах находятся в области с низким уровнем радиации и почти полностью экранированы от потоков частиц СКЛ геомагнитным полем. В высоких широтах основной вклад в поглощённую дозу радиацию вносят частицы СКЛ, электроны внешнего ЕРПЗ и высыпания частиц из радиационных поясов в районах северного и южного аврорального овала. На низких широтах вклад в поглощённую дозу дают

высокоэнергичные электроны в области магнитной аномалии и, в меньшей степени, высокоэнергичные протоны внутреннего ЕРПЗ. Вкладом от тормозного излучения релятивистских электронов для низкоорбитальных КА можно пренебречь [1].

Трассы средневысотных спутников пролегают между центрами первого и второго радиационных поясов — в областях, где наблюдается провал в интенсивности потока протонов и электронов. Высоты средневысотных орбит примерно составляют 5—15 тыс. км. Основной вклад в радиационную обстановку на таких орбитах дают потоки электронов интенсивности $10^2 \dots 10^6 \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$ [11]. К настоящему моменту времени эти орбиты только начинают осваиваться и считаются эффективными в организации радиотелефонии и широкополосной связи. Отметим группировки спутников ICO, «Spaceway», «Odyssey» и «Ростелесат», расположенные практически на одной и той же круговой средневысотной орбите (10352...10355 км).

Категория высоких орбит включает в себя диапазон высот выше центра внешнего радиационного пояса Земли, начиная с 18000 км. В это семейство обычно включают круговые полусинхронные орбиты со средней высотой 20200 км, используемые навигационными системами GPS (20100 км), GLONASS (19100 км), «Galileo» (23200 км) и «Beidou» (20900 км). В отличие от низких солнечно-синхронных орбит ионизирующие излучения здесь сильно подвержены влиянию солнечной активности и состоянию околопланетной среды [2, 6]. За время солнечной активности интенсивность СКЛ на таких орбитах за несколько часов может изменяться в десятки и даже сотни раз [15]. Основной вклад в поглощённую дозу радиации на высоких орбитах дают потоки частиц СКЛ, релятивистские электроны внешнего ЕРПЗ и тормозное излучение релятивистских электронов. Потоками протонов ЕРПЗ здесь можно полностью пренебречь [1].

Геостационарная орбита (ГСО) расположена на высоте 35786 км и «открыта» для галактических и солнечных космических лучей. Помимо них, на орбите наблюдаются потоки электронов ЕРПЗ с энергией до 6 МэВ, потоки протонов с энергией до 2 МэВ, а также высокоскоростные потоки плазмы солнечного ветра, возникающие во время солнечной активности и существенно увеличивающие интенсивность частиц ЕРПЗ [2]. При отсутствии солнечных вспышек основной вклад в поглощённую дозу на ГСО дают высокоэнергичные электроны ЕРПЗ и тормозное излучение. Интенсивность потока релятивистских электронов на таких орбитах имеет ярко выраженный периодический характер. На характеристике прослеживаются две основные гармоники с периодами около 27 и 31 сут, близкими к периоду вращения Солнца. Их наличие указывает на существование двух областей на Солнце (одна вблизи солнечного экватора, а вторая — в высоких широтах), активность

которых и определяет радиационные условия на геостационарных орбитах [2].

Кроме вышеназванных семейств, находят применение и эллиптические орбиты с большим эксцентриситетом, когда перигей орбиты находится в области низких круговых орбит, а апогей — в области ГСО и выше (КА «Vogalis», «Archimedes», «Молния», «Тундра»). Основной вклад в радиационную обстановку на таких орбитах дают участки траектории, расположенные в радиационных поясах.

Приложение Б

УРОВНИ ПОГЛОЩЕННЫХ ДОЗ ДЛЯ МАТЕРИАЛОВ НА БОРТУ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

Формулировка требований к подготовке космического полета невозможна без учета радиационных условий на борту космического аппарата и корректной оценки радиационных доз, приобретаемых материалами и изделиями КА. Для первичных оценок применяют таблицы пространственного и энергетического распределений протонов и электронов на выбранной космической орбите, полученные путем «усреднения» уже имеющихся экспериментальных данных, и используют физико-математические модели, описывающие пространственно-временные вариации этих величин. На следующем этапе к полученной интенсивности потока добавляется некоторый «запас прочности», основанный на предварительных данных о вероятности и интенсивности ожидаемых спорадических солнечных вспышек, приходящихся на рассчитываемый период работы спутника. Практика показывает, что несмотря на существенное влияние солнечной активности на радиационную обстановку, ее вклад в полную годовую дозу не превышает 10 % [3, 7]. На следующем этапе детализации расчетов проводится расчет интенсивности потоков электронов и протонов за защитным экраном, создаваемым оболочкой КА, в качестве материала экрана обычно выбирается алюминий. На заключительном этапе определяется интересующий нас уровень поглощенной дозы в материале-детекторе, веществом детектора достаточно часто выбирают кремний [7, 9].

За последние три года в российской научной периодике появилась серия публикаций [1, 2, 4, 5, 16], где дана оценка радиационной обстановки внутри конкретных космических аппаратов, расположенных на типичных околоземных орбитах — низко-, высокоорбитальных и геостационарных. На эти же орбиты планируется вывод и украинских спутников («Січ-2М», «Січ-3-О», «Січ-3-Р», «Попередження», «Інтербол-Прогноз» — на низкие и солнечно-синхронные орбиты, «Либідь» — на ГСО), поэтому имеет смысл остановиться на вопросе накопленной радиационной дозы более подробно.

В работе [4] были оценены радиационные условия внутри низкоорбитального КА «Ионосфера» (высота на экваторе 820 км). Как выяснилось, ожидаемый суммарный поток частиц РПЗ на орбите аппарата за 8 лет активного функционирования будет приблизительно составлять 10^{14} см⁻² для электронов и 10^{12} см⁻² для протонов, а суммарный поток частиц СКЛ оказывается на четыре порядка меньше. С учетом того что толщина стенок корпуса КА «Ионосфера» составляет 8 мм и выше, из результатов расчета следовало, что поглощенная доза внутри КА (выделенная потоком частиц энергия в единице массы вещества) не будет превышать 4 крад за весь срок его восьмилетнего существования. Такой же порядок для интенсивности дозы (приблизительно 1 крад в год) должен наблюдаться и для недавно запущенных низкоорбитальных микроспутников «Канопус-В» (Россия) и БКА (Белоруссия), имеющих более низкую круговую орбиту 510 км и меньшую толщину корпуса (4 мм) [1]. Здесь же в качестве примера приведена оценка дозы для того же аппарата, но находящегося на орбите 600 км — поглощенная доза здесь будет составлять 1200 рад в год.

На орбитах КА ГЛОНАСС (категория высоких орбит) интенсивность электронов составляет величину порядка 10^8 см⁻²с⁻¹ в максимуме солнечной активности и 10^5 см⁻²с⁻¹ вне спорадических солнечных вспышек. При толщине корпуса КА в 4 мм (и более) главный вклад в поглощенную дозу дает тормозное излучение электронов. Ожидаемая мощность поглощенной дозы радиации оценена в 130 крад в год [1].

В работе [2] дана оценка радиационной обстановки внутри КА на геостационарной орбите. Мощность приобретенной дозы здесь повторяет временный периодический профиль интенсивности потока электронов на орбите и в среднем составляет 2000 см⁻²с⁻¹. Из расчетных данных следует, что за алюминиевой обшивкой толщины 4 мм основной вклад в поглощенную дозу будут давать релятивистские электроны ЕРПЗ. Значения ожидаемых в 2012 г. поглощенных доз радиации для аппаратов такой толщины оказались равными 34 крад. Алюминиевый корпус толщиной в 12 мм уже полностью поглощает весь поток электронов ЕРПЗ, остаются лишь потоки тормозного излучения электронов и потоки высокоэнергичных частиц ГКЛ и СКЛ. Отмечено [2, 3], что с увеличением толщины обшивки КА доза облучения за счет тормозного излучения становится преобладающей. Так, поглощенная доза радиации за счет тормозного электромагнитного излучения при прохождении 11-мм слоя алюминия более чем в две тысячи раз превосходит электронную составляющую, генерирующую это излучение.

Таким образом, основной вклад в радиационную обстановку внутри космического аппарата дают частицы галактических космических лучей сверхвысоких энер-

гий, порождающие ливни вторичных частиц в веществе за счет продуктов ядерных превращений, поток электронов, и тормозное излучение от электронов, обладающее еще большей проникающей способностью, чем исходные частицы. Важно отметить, что в процессе торможения электрон передает электромагнитному кванту значительную часть своей энергии, а иногда — и всю [2, 3]. Поэтому электронный поток, проходя через обшивку КА достаточной толщины, трансформируется в жесткое электромагнитное излучение практически такой же интенсивности, что и первичный поток электронов. Установлено, что порядка одной трети всех наблюдаемых на КА поломок связаны именно с потоком высокоэнергичных электронов и вызванным им тормозным излучением [14].

Работа выполнена при поддержке Украинского научно-технологического центра, грант № 5500.

1. Безродных И. П., Казанцев С. Г., Семенов В. Т. Радиационные условия на солнечно-синхронных орбитах в период максимума солнечной активности // Вопросы электромеханики. Тр. НПП ВНИИЭМ. — 2010. — **116**. — С. 23—26.
2. Безродных И. П., Морозова Е. И., Петрукович А. А. и др. Радиационные условия на геостационарной орбите // Вопросы электромеханики. Тр. НПП ВНИИЭМ. — 2010. — **117**. — С. 33—42.
3. Безродных И. П., Морозова Е. И., Петрукович А. А. и др. Тормозное излучение электронов в веществе космического аппарата. Методика расчёта // Вопросы электромеханики. Тр. НПП ВНИИЭМ. — 2011. — **120**, № 1. — С. 37—44.
4. Безродных И. П., Морозова Е. И., Петрукович А. А. и др. Радиационные условия на орбите КА «Ионосфера» // Вопросы электромеханики. Тр. НПП ВНИИЭМ. — 2011. — **123**. — С. 19—28.
5. Безродных И. П., Семенов В. Т. Ливни релятивистских частиц внутри космических аппаратов типа «Метеор» // Вопросы электромеханики. Тр. НПП ВНИИЭМ. — 2009. — **113**, № 6. — С. 27—32.
6. Безродных И. П., Шафер Ю. Г. Динамика потоков электронов на геостационарной орбите и их связь с солнечной активностью // Изв. АН СССР. Сер. физ. — 1983. — **47**, № 9. — С. 1684—1686.
7. Гецелев И. В., Зубарев А. И., Пудовкин О. Л. Радиационная обстановка на борту космических аппаратов. — М.: УИПК, 2001. — 316 с.
8. Клименко Ю. А., Черемных О. К., Яценко В. А., Маслова Н. В. Состояние и перспективы создания микроспутников новых поколений: новые материалы, нанотехнология и архитектура // Космічна наука і технологія. — 2001. — **7**, № 2/3. — С. 53—65.
9. Кременецкий И. О., Черемных О. К. Космічна погода: механізми і прояви. — Київ: Наук. думка, 2009. — 144 с.
10. Кузнецов Н. В. Радиационные условия на орбитах космических аппаратов // Модель космоса / Под ред. М. И. Панасюка. — М., 2007. — Т. 1. — С. 627—641.
11. Морозова Е. И., Безродных И. П., Семенов В. Т. Радиационные факторы риска для космических аппаратов // Вопросы электромеханики. Тр. НПП ВНИИЭМ. — 2009. — **112**. — С. 35—40.
12. Новиков Л. С. Радиационные воздействия на материалы космических аппаратов. — М.: Университетская книга, 2010. — 192 с.
13. Новиков Л. С., Воронина Е. Н. Перспективы применения наноматериалов в космической технике. — М.: Университетская книга, 2008. — 188 с.
14. Новиков Л. С., Милеев В. Н., Воронина Е. Н. и др. Радиационные воздействия на материалы космической техники // Поверхность, рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. — 2009. — № 3. — С. 32—48.
15. Шилов А. Е., Волков С. Н., Безродных И. П. и др. Радиационные условия для высокоорбитальных космических аппаратов в период максимума солнечной активности // Вопросы электромеханики. Тр. НПП ВНИИЭМ. — 2010. — **115**. — С. 47—52.
16. Applications of nanotechnology in space developments and systems. Technological analysis // VDI Technology Center Future Technologies Division, Düsseldorf, Germany. Future Technologies. — N 47. — 2003. — 135 p.
17. Conway B. E. Electrochemical supercapacitors: scientific fundamentals and technological applications. — Springer, 1999. — 736 p.
18. Daglis I. A. Effects of space weather on technology infrastructure. — Dordrecht: Kluwer, 2005. — 334 p. — (NATO Science Series).
19. Desprez P., Barrailh G., Moreau L., et al. Ultracapacitors: a power buffer in satellites // Space Power, Proceedings of the Sixth European Conference. Portugal. European Space Agency, ESA SP-502. — 2002. — P. 23—26.
20. FreedomCAR Ultracapacitor test manual // Idaho National Engineering Laboratory Report. — 2004. — Sep. 21. — DOE/NE-ID-11173.
21. Hadjipaschalis I., Poullikkas A., Efthimiou V. Overview of current and future energy storage technologies for electric power applications // Renewable and Sustainable Energy Revs. — 2009. — **13**. — P. 1513—1522.
22. Kalugin O. N., Chaban V. V., Loskutov V. V., Prezhdo O. V. Uniform diffusion of acetonitrile inside carbon nanotube favors supercapacitor performance // Nano Lett. — 2008. — N 8. — P. 2126—2130.
23. Krashennnikov A. V., Nordlund K. Ion and electron irradiation-induced effects in nanostructured materials // J. Appl. Phys. — 2010. — **107**, 071301. — 70 p.

24. *Maini A. K., Agraval V.* Satellite technology: principles and application. — The Atrium. Southern Gate, Chichester, West Sussex, England: John Wiley & Song Ltd, 2007. — 560 p.
25. *Maletín Y. et al.* // Proc. 22nd Internat. Seminar on Double Layer Capacitor and Hybrid Energy Storage Devices. — Deerfield Beach, FL, 2012. — P. 180—185.
26. *Shojah-Ardalan S., Wilkins R., Machado H., et al.* Susceptibility of ultracapacitors to proton and gamma irradiation // Workshop Record of the 2003 IEEE Radiation Effects Data Workshop. — 2003. — P. 89—91.

Стаття надійшла до редакції 16.05.13

*Ю. О. Клименко, О. В. Семенов, А. В. Беспалова,
Ю. В. Пруцко, Ю. А. Малетин, Н. Г. Стрижакова,
С. О. Зелинский, С. О. Тичина, Д. М. Дробний,
В. Б. Неймаиш, В. М. Порошин, В. Ю. Поварчук*

РАДІАЦІЙНА СПРИЙНЯТЛИВІСТЬ СУПЕРКОНДЕНСАТОРІВ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ЇХНЬОГО КОСМІЧНОГО ЗАСТОСУВАННЯ

Розглянуто перспективи застосування суперконденсаторів як елементів супутникової системи енергопостачання. Проведено серію лабораторних досліджень впливу гамма- та електронного опромінення на характеристики суперконденсаторів. Встановлено, що сумарна еквіва-

лентна доза радіації, яка спричиняє погіршення основних технічних характеристик джерела живлення, може накопичуватися на навколосезонних орбітах за час, що значно перевищує час експлуатації супутника. Показано, що найбільш чутливим до дії радіації елементом конструкції суперконденсаторів є електроліт.

*Yu. O. Klymenko, O. V. Semeniv, A. V. Bezpalova,
Yu. V. Prutsko, Yu. A. Maletin, N. G. Stryzhakova,
S. O. Zelinskyi, S. O. Tychna, D. M. Drobnyi,
V. B. Neymash, V. N. Poroshin, V. Yu. Povarchuk*

RADIATION SUSCEPTIBILITY OF SUPERCAPACITORS AND PROSPECTS FOR THEIR SPACE APPLICATIONS

The prospects for the use of supercapacitors as elements of a satellite energy supply system are considered. A series of laboratory experiments to study the influence of gamma and electron irradiations on the supercapacitor performance is carried out. It is found that the total equivalent radiation dose that degrades the main technical characteristics of the supercapacitors can be accumulated in the Earth's orbits during the time that is much longer than the satellite lifetime. The electrolyte is shown to be the most sensitive supercapacitor element to ionizing radiation.