

# ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛИ ДЕГРАДАЦИИ СОЛНЕЧНОЙ БАТАРЕИ В КОСМИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

А.С. Китаева

*Московский Авиационный Институт (государственный технический университет)*

E-mail: [Bee-Aynil@mail.ru](mailto:Bee-Aynil@mail.ru)

In the article the influence of aerospace factors on the solar panel is described. The decomposition of interacting physical processes is represented in order to build a dynamic adaptive model of solar battery characteristics degradation, which will consider synergistic effects.

На космический аппарат (КА) за время вывода на орбиту и пребывания на ней воздействует в различной мере множество факторов окружающего пространства. Большинство из них уже изучены, проведены лабораторные исследования по определению влияния отдельных факторов на материалы и элементы КА, построены математические модели отдельных процессов. Однако совместное воздействие нескольких факторов исследовано недостаточно.

Рассмотрим 2 вида деградации солнечной батареи (СБ): радиационную и оптическую деградацию под воздействием собственной внешней атмосферы КА.

*Радиационная деградация* может быть вызвана несколькими факторами, для каждого из которых характерны свои высоты орбит: плазма межпланетного пространства, горячая магнитосферная плазма, электроны и ионы радиационных поясов Земли (РПЗ), протоны солнечных вспышек, потоки ядер высоких энергий. Рассмотрим воздействие протонов на фотоэлемент.

Радиационному воздействию в фотоэлементе подвергаются в первую очередь защитное стекло, просветляющее покрытие и сам полупроводник.

1. Под действием УФ-излучения и плазмы космоса происходит радиационное объёмное окрашивание кварцевого защитного стекла, что приводит к снижению его прозрачности и фото-ЭДС.
2. Протоны создают в кремниевых ФЭП радиационные дефекты, уменьшающие время жизни неосновных носителей заряда, вызывают увеличение скорости поверхностной рекомбинации и увеличивают токи утечки, что влияет на напряжение холостого хода, ток короткого замыкания и максимальную мощность. [1].

*Собственная внешняя атмосфера (СВА)*, окружающая КА, преимущественно образована испарением неметаллических материалов: клеев, полимерных плёнок и покрытий, а так же продуктами распыления материалов внешних поверхностей КА при попадании на них ускоренных ионов, формируемых при работе электроракетных двигателей (ЭРД).

Конденсирующиеся вещества из СВА образуют на поверхности СБ загрязняющую плёнку и снижают коэффициент пропускания защитного стекла на 10-15%. На процессы конденсации и свойства образующихся плёнок влияет множество факторов: температура поверхности СБ, потоки заряженных частиц (радиационное воздействие), состав СВА, который в свою очередь зависит от

геометрического расположения источников массы и их скорости массовыделения. Причём воздействие этих факторов может быть не аддитивным [2].

Например, в зависимости от плотности тока ускоренные ионы либо способствуют нарастанию плёнки, либо разрушают её. При низкой плотности тока образующиеся под действием радиации вакансии в слое защитного стекла в паре с атомами загрязняющего вещества становятся центрами конденсации плёнки, что ускоряет процесс её образования и делает её прочнее. При возрастании плотности тока значение этого эффекта пропадает, т.к. точечные дефекты являются центрами рассеяния фононов, которые вызывают колебания, способствующие десорбции частиц плёнки. УФ-излучение напротив способствует прилипанию загрязняющих частиц к поверхности фотоэлектрического преобразователя (ФЭП) из-за увеличения скорости химических реакций [3].

Даже после описания механизмов воздействия рассмотренных выше факторов, видно, что составить единую модель их влияния на характеристики СБ не просто. Модель должна быть динамической и нелинейной, так как большинство факторов действуют непостоянно и влияют не только непосредственно на СБ, но и друг на друга. Проведение экспериментов со всевозможными комбинациями этих факторов и их интенсивностью не представляется возможным в силу их сложности. В связи с этим возникает необходимость построения математической модели процессов воздействия внешней среды на СБ, которая позволит определить критическую траекторию изменения характеристик [4] и ресурс СБ в реальных условиях эксплуатации.

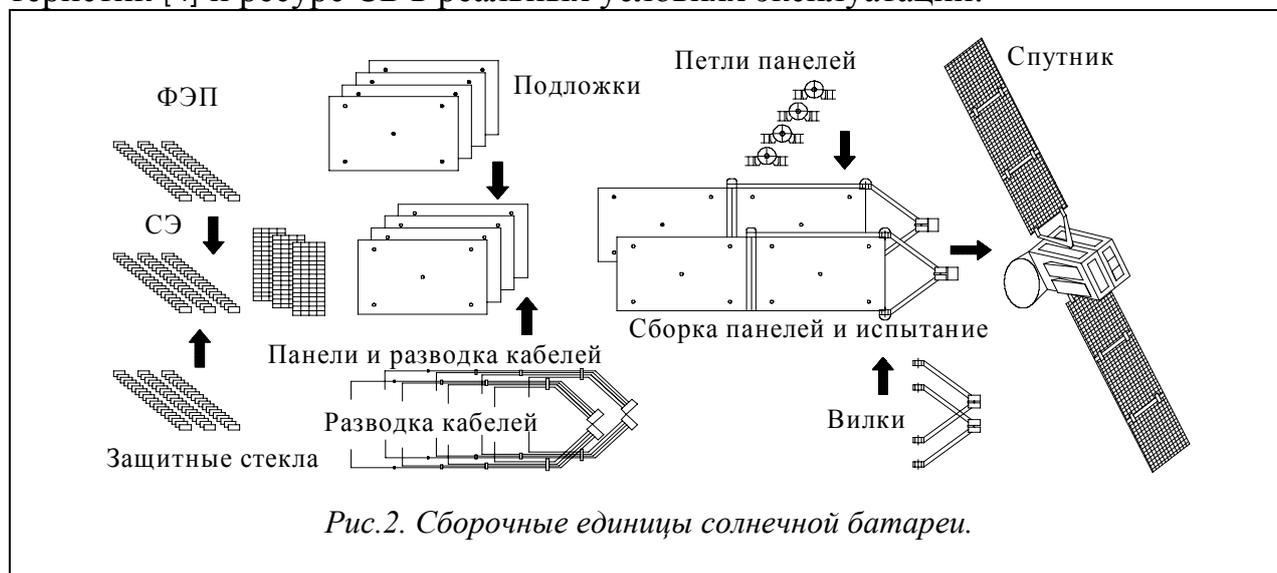
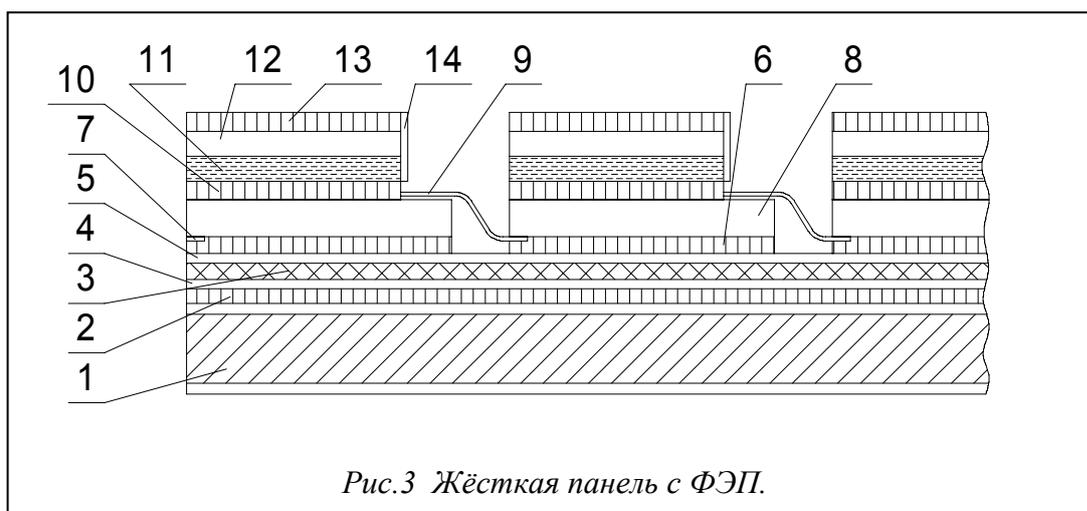


Рис.2. Сборочные единицы солнечной батареи.

Солнечная батарея представляет собой сложную многоуровневую систему [5], включающую в себя от 4 до 10 параллельно соединённых шарнирами панелей, состоящих из множества последовательно-параллельно соединённых ФЭП (мы рассматриваем ФЭП из монокристаллического кремния  $10(20) \times 20(30)$  мм, толщиной  $\sim 0,5-1$  мм при толщине n-p перехода  $\sim 0,5$  мкм) с шунтирующими диодами, системы ориентации и стабилизации. Рис.2.

Панели могут представлять собой или сетеполотно, натянутое в конструктивной раме солнечной батареи (русский вариант), или быть жестким и,

как крыло самолета, содержать продольный и поперечный набор элементов (западный вариант). Рис.3.



1- панель, 2- клей, 3- пластмассовая подложка, армированная стекловолокном, 4,5- токонесущие шины, 6- клей, 7- тыльный контакт, 8- ФЭП из монокристалла кремния, 9- лицевой контакт, 10- клей, 11- фильтр, 12- кварцевое стекло, 13- просветляющее покрытие, 14- торцевое защитное стекло.

СБ как цельную динамическую систему подвергающуюся одновременному воздействию различных факторов космической среды рассматривать сложно. Построение единой модели нецелесообразно, ввиду большого количества входных данных, которые зачастую отсутствуют. Возможно представление системы как отдельных элементов, на которые аддитивно воздействуют различные факторы и процессы, модели которых значительно легче составить. В случае исчезновения каких-либо факторов, состояние системы мгновенно меняется, в случае отсутствия первичной информации с помощью табличных моделей алгебраическая модель заменяется на соответствующее значение с известной степенью точности, либо заменяется усреднённым значением, либо процесс вообще не учитывается.

На рис.4 представлена схема воздействия 3 факторов космического пространства на защитное кварцевое стекло и кремниевый фотоэлемент.

Здесь: овалы - процессы, прямоугольники - объекты (элементы системы), пунктиром обозначены аддитивные процессы, пунктирные стрелки - логическое «и», сплошные стрелки - логическое «или»;

УФ - ультрафиолетовое излучение, р - протоны, СВА - собственная внешняя атмосфера КА, нр - нормальная работа батареи, N< - снижение выходной мощности фотобатареи;

1 - радиационное окрашивание, 2 - появление радиационных дефектов, 2.1 - увеличение скорости поверхностной рекомбинации, 2.2 - увеличение токов утечки, 2.3 - рекомбинация неосновных носителей, 3 - образование плёнки, 4 - разрушение плёнки, 5 - Ускорение роста плёнки, 6 - повышение температуры, 7 - повышение коэффициента поглощения, 8 - разрушение стекла, 9 - снижение прозрачности.

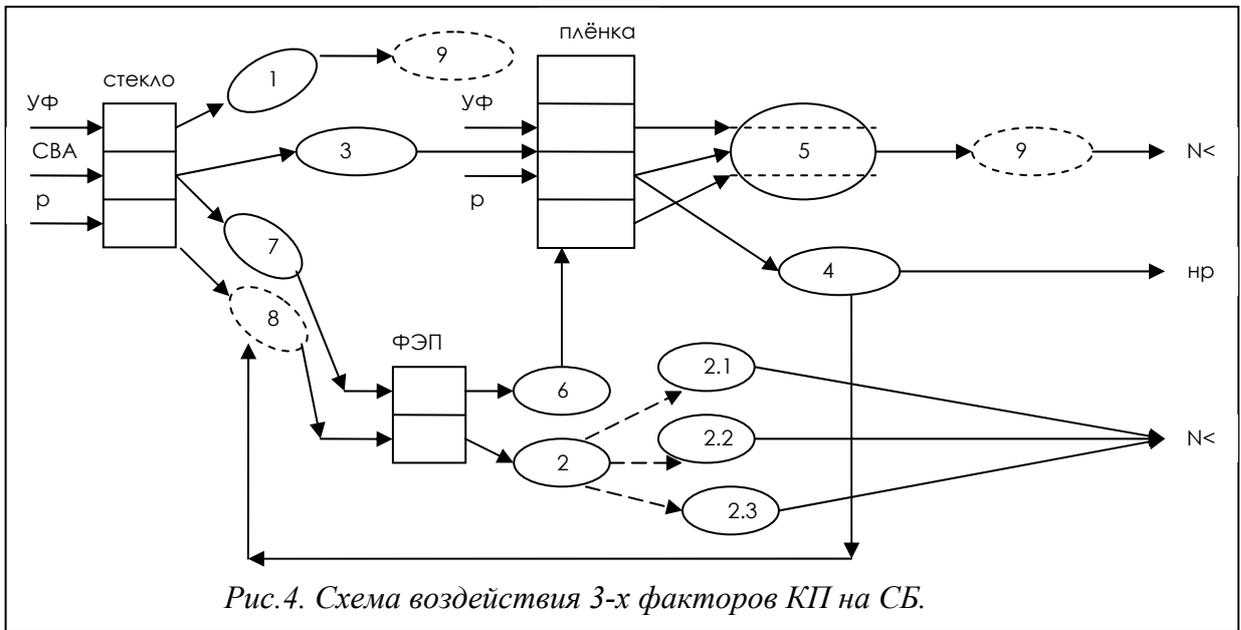


Рис.4. Схема воздействия 3-х факторов КП на СБ.

Для каждого процесса также может быть составлена более детальная схема. Подобная декомпозиция целесообразна до того уровня, на котором воздействие различных процессов и факторов на конечный элемент системы станут аддитивными.

Рассмотрим процесс радиационной деградации p-n перехода. Рис.5. Под действием частиц высоких энергий (протонов и α-частиц) в базовом слое фотоэлемента образуются пары Френкеля (вакансия-межузлие), которые являются причиной рекомбинации неосновных носителей.

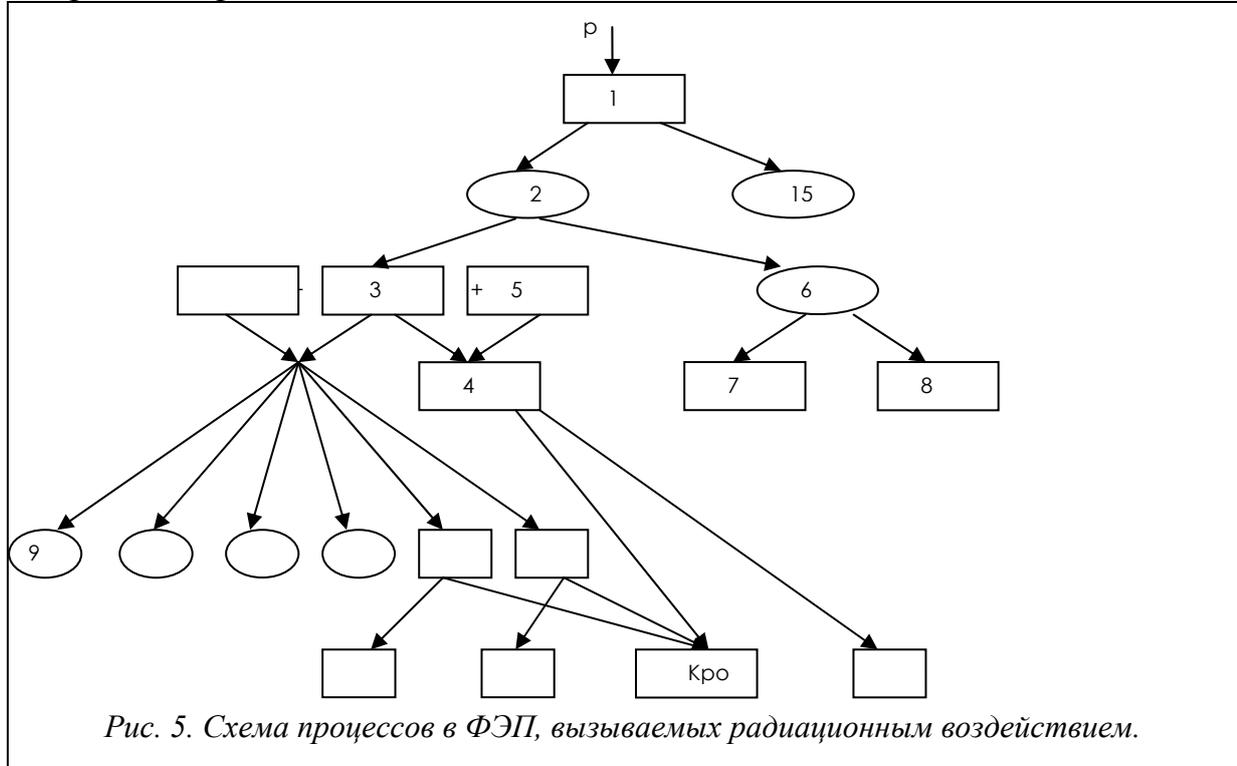


Рис. 5. Схема процессов в ФЭП, вызываемых радиационным воздействием.

Р – протоны, 1- ФЭП, 2- передача энергии от протонов базовому слою фотоэлемента, 2- пары Френкеля, 4- дивакансии, 5- примесь, 6- появление в запрещённой зоне локальных энергетических уровней, 7- доноры, 8- акцепторы, 9- изменение положения примесей в решётке, 10- эффект Уоткинса (вытесне-

ние узловой примеси в междоузлие собственным междоузельным атомом), 11- растворение междоузельных примесей в радиационных вакансиях, 12 - аннигиляция вакансий и междоузлий, 13- комплекс вакансия-примесь, 14- комплекс междоузельный атом-примесь, 15- образование новых примесей в результате ядерных реакций, [6].

Вероятность рекомбинации неосновных носителей в облученном полупроводнике, равная  $1/\tau$  складывается из вероятности рекомбинации через центры, существовавшие до облучения  $1/\tau_0$ , и центры, генерированные ионизирующим излучением. Это наблюдается, когда рекомбинация при постоянном уровне инжекции носителей идет независимо через оба канала. Тогда в случае воздействия ионизирующего излучения имеет место соотношение вида

$1/\tau = 1/\tau_0 + K\Phi$ , где  $\tau_0$  – время жизни носителей до и после облучения флюенсом  $\Phi$ ;  $K$  - коэффициент повреждения, характеризующий эффективность введение дефектов единичным потоком частиц и вероятность рекомбинации на них.

В общем случае , где  $K = K_{\text{тд}} + K_{\text{ор}}$ ,  $K_{\text{тд}}$  и  $K_{\text{ор}}$  коэффициенты повреждения полупроводника соответственно от точечных радиационных дефектов и от более сложных дефектов, так называемых областей разупорядочения, возникающих при большой концентрации точечных дефектов и сильном притяжении между ними [7].

1. В.А. Летин. Функционирование солнечных батарей в космической среде. Модель космоса. № 2(8), с. 568-571, 2007.
2. А.Б. Надирадзе, В.В. Шапошников, В.В. Хартов, И.А. Максимов, В.В. Иванов, В.А. Смирнов. Моделирование процессов формирования собственной внешней атмосферы и загрязнения поверхности космических аппаратов. Модель космоса. № 2(8), с. 45-58, 2007.
3. М.Б. Гусева. Ионная стимуляция в процессах образования тонких плёнок на поверхности твёрдого тела. Соровский образовательный журнал, №10, 1993.
4. А.Б. Надирадзе. Прогнозирование стойкости материалов к многофакторному воздействию окружающей среды. Перспективные материалы 2007, №4.
5. Л.Н. Лесневский, В.Н. Тюрин. Конспект лекций по дисциплине технология производства космических энергоустановок. МАИ.
6. О.В. Скаляух. Дефектообразование в кремнии при облучении альфа-частицами с энергией 5,4 МэВ. Дис. канд. физ.-мат. наук: 01.04.10: Ульяновск, 2005.
7. Акишин А.И. Космическое материаловедение. Методическое и учебное пособие.–М: НИИЯФ МГУ, 2007.