

© Е. М. Твердохлебова, А. Г. Корсун,
Ф. Ф. Габдуллин, Г. Ф. Карабаджак

ФГУП ЦНИИмашиностроения, Россия

ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ПЛАЗМЕННОМ ОКРУЖЕНИИ МКС

Розглядаються властивості електричних розрядів, які можуть запалюватися між елементами Міжнародної космічної станції (МКС) під дією електричного поля високовольтних сонячних батарей (ВВ СБ). Характеристики плазмового оточення станції розраховуються з урахуванням дії на нього іонізуючих потоків у іоносфері, магнітного поля Землі та електричного поля ВВ СБ. Описується постановка космічного експерименту «Плазма-МКС», завданням якого є дослідження параметрів плазмового оточення МКС, що формується при роботі бортових космічних двигунів та інших плазмових джерел, за характеристиками оптичного випромінювання.

ВВЕДЕНИЕ

Электроразрядные процессы в газоплазменном окружении Международной космической станции определяются электрическим полем $\epsilon_B = 160$ В, создаваемым высоковольтными солнечными батареями американского сегмента (АС), и поляризацией $\epsilon_p \approx 20$ В станции при ее движении поперек магнитного поля. Отрицательный полюс ВВ СБ закорочен на корпус МКС, а активная сторона солнечной панели имеет электрический контакт с окружающей плазмой. Поэтому между высоковольтными концами стрингов солнечных панелей и корпусом МКС течет ток утечки из СБ через окружающую плазму, т.е. имеет место слабый электрический разряд.

При обтекании МКС только разреженной ионосферной плазмой этот разряд является несамостоятельным слабым. При увеличении плотности окружающей плазмы могут возникнуть различные сильноточные разряды. В данном пространственном электрическом разряде катодом являются все элементы корпуса МКС и часть СБ вблизи ее отрицательного полюса. Анодом служит высоковольтная часть панели СБ. Электрический потенциал в разрядном промежутке распределяется в зависимости от параметров плазменного окружения и от свойств мозаичных, металлодиэлектрических поверхностей анода и катода.

Цель представленной работы состоит в определении параметров плазменного окружения, изменяющихся при работе космических двигателей позиционирования и ориентации (ДПО), плазменных контакторов PCU (Plasma Contactor Unit) и других бортовых источников газа и плазмы.

Ранее выполненные теоретические исследования и расчеты, базирующиеся на пассивном собирании электронов и ионов из окружающей плазмы, дали основание ожидать, что отрицательное смещение потенциала станции относительно окружающей плазмы может достигать -140 В [3]. Это напряжение сосредотачивается в прикатодном, тонком слое вблизи проводящих участков корпуса и на его диэлектрических покрытиях. Величина пробойного напряжения наиболее тонких слоев этого покрытия составляет $80-90$ В [8], поэтому есть опасность пробоев на защитных экранах, приводящих к деградации их характеристик.

Для исключения пробоев на Американском сегменте МКС установлены газоразрядные катоды-компенсаторы — блок PCU. Они создают струю ксенонной плазмы, через которую происходит сброс отрицательного заряда с корпуса МКС. В результате величина прикатодного падения потенциала удерживается на уровне $\Delta\varphi_c < 40$ В при величине инжектируемого катодом тока до 12 А [7]. Однако при отключении PCU или при значительном изменении плотности окружающей плазмы распределение потенциалов в пространственном разряде может измениться, и величина прикатодного падения возрастет, то есть отрицательное смещение корпуса станции относительно окружающей плазмы резко увеличится.

В течение 2001 года американскими учеными проведена серия экспериментальных исследований параметров окружающей МКС плазмы и величины потенциала поверхности [2, 4]. В частности, установлено следующее.

1. При выключенном PCU и в отсутствие других источников плазмы или газа напряжение «корпус—

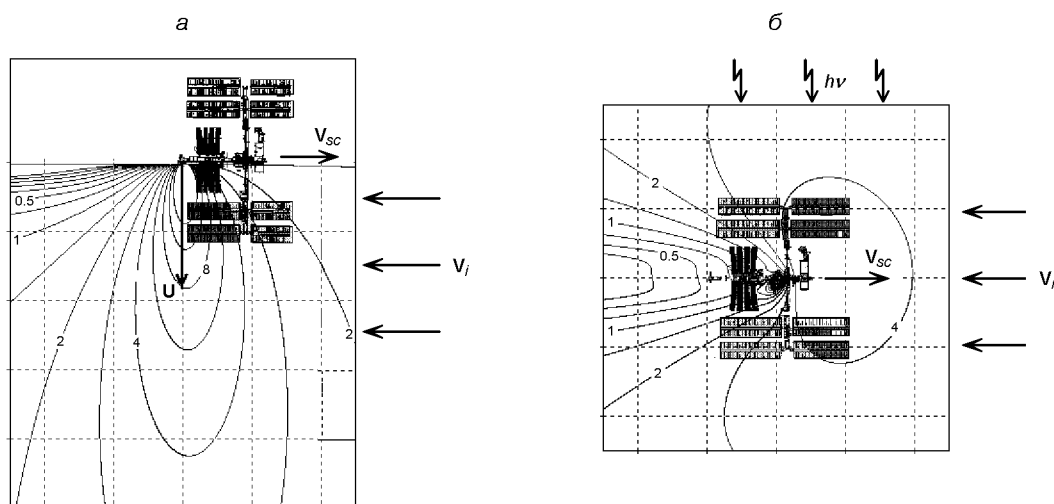


Рис. 1. Модификация СВА под действием набегающей ионосферы: *а* — при работе двигателя ДПО, *б* — под действием УФ-излучения. Числа у кривых — значения n в единицах 10^6 см^{-3} . Соседние изоконцентрали различаются в 1.4 раза

плазма» возрастает незначительно. Для предмета нашего рассмотрения этот факт указывает на то, что, во-первых, в разрядном промежутке происходят эффективные прикатодные процессы собирания зарядов, а во-вторых, основная разность потенциалов падает в прианодном слое.

2. При работающем блоке PCU ток в цепи PCU—СБ на некоторых участках орбиты возрастает на небольшое время. Это говорит о том, что слабая плазменная струя чутко реагирует на изменение электроразрядной обстановки вокруг станции. Более того, ниже будет показано, что плазменная струя существенно влияет на параметры разряда в пространственной электрической цепи PCU—СБ.

3. На некоторых участках траектории орбитального полета станции при выключенном блоке PCU возникают кратковременные пики потенциала. В предлагаемой работе сделана попытка интерпретировать эти явления и показать доминирующее влияние магнитного поля Земли на электроразрядные процессы в плазменном окружении станции.

ПЛАЗМЕННОЕ ОКРУЖЕНИЕ МКС

Под действием ионизирующих потоков в собственной внешней атмосфере (СВА) станции возникает «собственная ионосфера» с неоднородным распределением плотности ионизованных частиц. В результате вокруг МКС возникают крупномасштабные области пространства как с повышенной, так и

пониженной плотностью плазмы относительно фоновой ионосферы [5].

Основными процессами, которые приводят к образованию «собственной ионосферы» в условиях полета МКС, являются фотоионизация нейтралов СВА излучением Солнца и торможение в СВА набегающего потока ионов атомарного кислорода O^+ . На рис. 1 представлены результаты расчетов распределения электронной концентрации (n , 10^6 см^{-3}) в «собственной ионосфере» МКС для двух источников:

для струи одного из двигателей ДПО, установленных на служебном модуле МКС и на корабле «Прогресс». Концентрация плазмы в струе работающего двигателя увеличивается под действием набегающего потока ионосферы. На рис. 1, *а* струя ЖРД истекает со скоростью U перпендикулярно к набегающему потоку $n_n V_i$.

для сравнительно плотной СВА станции, возникающей на несколько секунд после кратковременного срабатывания двигателя коррекции. В этом случае на сферически расширяющуюся СВА одновременно воздействует набегающий поток ионосферы и излучение Солнца. Параметры СВА взяты из данных измерений на ОС «Мир» [1]. На рис. 1, *б* поток ионов кислорода набегаёт со скоростью $V_i = 8 \text{ км/с}$, а УФ-излучение падает под углом $\beta = 90^\circ$ к вектору скорости МКС.

Таким образом, под воздействием энергии Солнца и кинетической энергии КА возникают не очень

плотные, но крупномасштабные плазменные образования.

Видно, что, во-первых, масштаб плазменной неоднородности сопоставим, и даже превосходит размеры МКС, а во-вторых, при возникновении «собственной ионосферы» различные элементы МКС оказываются в различном плазменном окружении. Вблизи некоторых из них концентрация плазмы n много больше, чем в фоновой ионосфере n_0 , а около других, находящихся в зоне тени от газового облака, намного меньше. В сочетании с неоднородным, довольно плотным фоном нейтралов СВА это означает, что зажигание разрядов под воздействием электрических полей высоковольтных солнечных батарей и протекание токов через окружающее пространство будет существенно зависеть от характеристик плазменного окружения.

ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНЫЕ ПРОЦЕССЫ

Опираясь на результаты проведенных исследований, можно выделить следующие часто реализуемые на МКС электроплазменные процессы.

1. Возникновение плазменного моста между положительно и отрицательно заряженными участками поверхности станции в тех случаях, когда струя ксеноновой плазмы из блока PCU под действием геомагнитного поля направляется на анодные участки ВВ СБ или на те участки фермы СБ, которые имеет положительный потенциал под действием поляризации.

2. Резкое увеличение тока, собираемого элементами МКС из плазменного окружения, из-за кратковременного повышения плотности СВА при срабатывании двигателей ДПО или других газовыделяющих систем.

3. Появление искровых разрядов на отдельных участках поверхности МКС вследствие увеличения отрицательного потенциала корпуса станции.

На основе трехмерной модели разлета плазменной струи в геомагнитном поле, так называемой Self-Similar Model (SSM) [6], были рассчитаны параметры процесса возникновения плазменного моста.

Суть явления состоит в следующем. PCU создает сильно расходящуюся струю плазмы с малым расходом $N \sim 10^{18} \text{ с}^{-1}$ и малой скоростью $U = 2...3 \text{ км/с}$ [7]. В такой струе, без учета влияния магнитного поля, концентрация становится меньше фоновой на расстоянии много меньшем, чем расстояние до анода (панели СБ) $L \approx 20...40 \text{ м}$. Согласно SSM-модели под воздействием геомагнитного поля B расширение струи плазмы поперек магнитных силовых

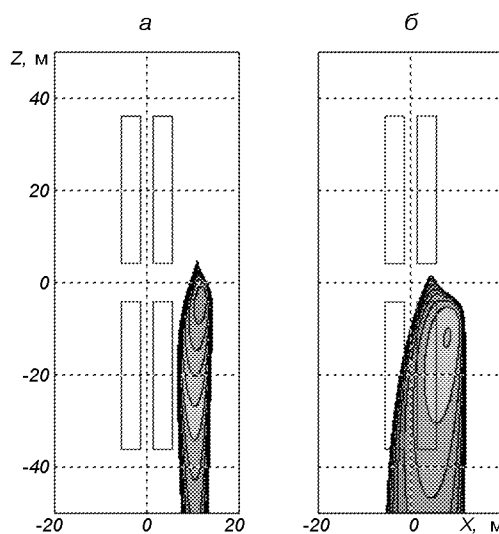


Рис. 2. Сечение плазменной струи PCU плоскостью панелей СБ при различном направлении магнитного поля Земли. Соседние изоконцентрали различаются в 1.5 раза. Пиковые значения концентраций — порядка $3 \cdot 10^8$ (а) и $0.9 \cdot 10^8 \text{ см}^{-3}$ (б)

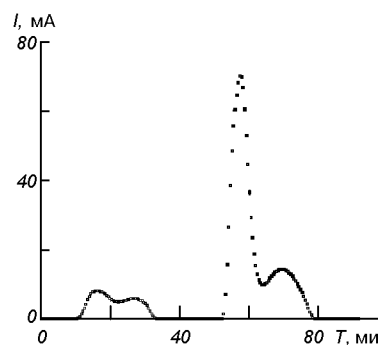


Рис. 3. Изменение величины тока, собираемого панелью СБ при движении МКС

линий сильно ограничено. В результате она приобретает форму тонкого лепестка, плоскость которого определяется вектором скорости струи и направлением геомагнитного поля B . При движении по орбите ориентация плоскости лепестка относительно станции изменяется. Кратковременно возникает такая конфигурация, при которой плазменный лепесток обтекает активную (анодную) поверхность СБ (или положительно смещенные участки фермы СБ). Тогда плотность плазмы Xe^+ вблизи солнечной панели заметно превышает плотность фоновой, не только спокойной, но и возмущенной ионосферы. В эти моменты времени ток в цепи PCU возрастает.

На рис. 2 показаны изоконцентрали плазменного лепестка PCU в плоскости расположения солнечной панели (панель показана контуром) для двух ситу-

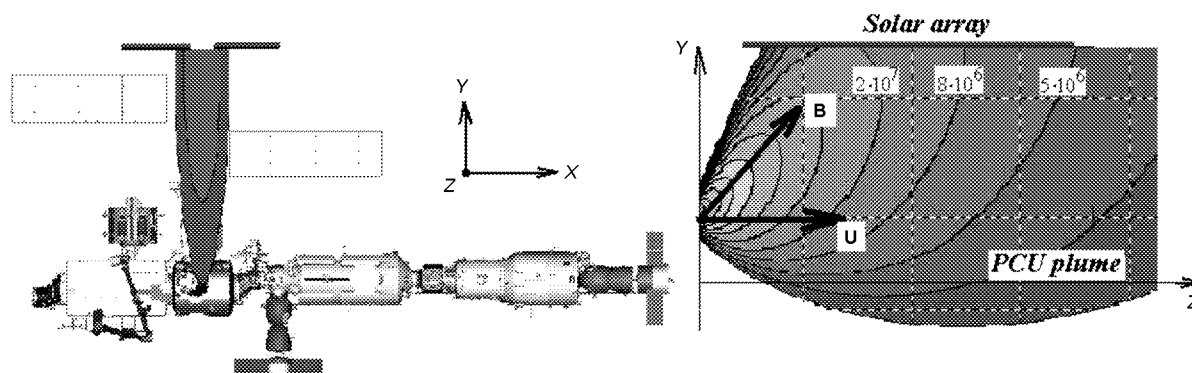


Рис. 4. Возникновение плазменного моста между PCU и панелью СБ

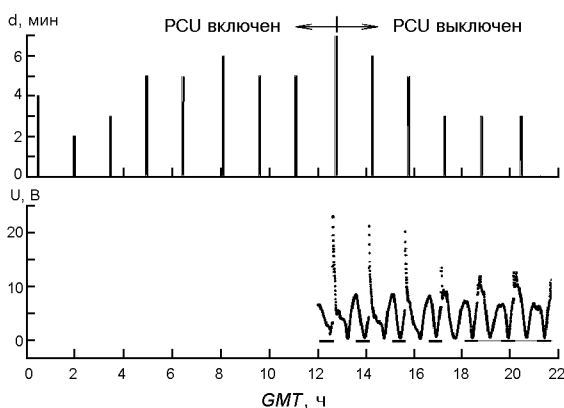


Рис. 5. Сопоставление прогноза методики SPEED для даты 11 апреля 2001 г. (вверху) и результатов эксперимента на МКС [3] (внизу)

фаций в течение одного витка: *a* — магнитное поле «направляет» струю мимо панелей СБ, *b* — солнечная батарея практически вся омывается ксеноновой плазмой PCU.

На рис. 3 представлен результат расчета величины тока, собираемого панелью СБ на этом же витке. Рис. 4 иллюстрирует вид сбоку для взаимного положения плазменной струи и МКС в этот момент времени.

В ходе проведения американскими специалистами экспериментальных измерений 11 апреля 2001 г. сочетание орбитальных, геометрических и светотеневых характеристик было таким, что эффект плазменного моста реализовался редко — только на коротких участках некоторых витков. Если в такой ситуации ни один из катодов PCU не работал, то потенциал станции падал, т. е. величина отрицательного смещения $\Delta\varphi_c$ резко увеличивалась. Для прогнозирования совокупности геофизических и орбитальных условий, при которых следует ожидать усиления электроплазменных процессов

на станции, была разработана методика SPEED (Spacecraft Plasma Environment and Electric Discharge). Эта методика позволяет точно прогнозировать начало и длительность такого события как возникновение «плазменного моста», сопровождающегося заметным изменением тока через катод PCU, или как скачкообразное изменение потенциала станции, если блок PCU отключен. На рис. 5 показаны в сравнении результаты расчета и измерений изменения электроразрядной обстановки на МКС, проведенных американскими специалистами [3].

КОСМИЧЕСКИЙ ЭКСПЕРИМЕНТ «ПЛАЗМА-МКС»

Электроразрядные процессы, описанные в предыдущем разделе, сопровождаются усилением интенсивности оптического излучения плазменного окружения. С целью исследования особенностей и интенсивности токовых процессов в плазменном окружении станции от конфигурации МКС и ее положения на орбите, от работы внешних бортовых систем и сезонного изменения внешних космических условий разработан космический эксперимент «Плазма-МКС». КЭ «Плазма-МКС» планируется проводить с имеющейся на борту МКС диагностической аппаратурой — спектрозональной системой «Фиалка-МВ-Космос», предназначенной для получения и регистрации изображений и спектров излучения различного типа электроразрядных процессов, происходящих как на поверхности МКС, так и в плазменном окружении станции. Результаты КЭ позволят подтвердить справедливость методики SPEED и спрогнозировать величину потенциала поверхности станции в зависимости от влияния различных факторов космического пространства, таких как: геомагнитное поле, солнечное излучение, набегающая ионосфера, потоки авроральных частиц и удары микрометеоритов.

ВЫВОДЫ

Протекание токов между разноименно заряженными элементами конструкции станции существенно зависят от параметров плазмы в пространстве разрядного промежутка, а также от величины и направления магнитного поля Земли.

Основными источниками, которые определяют электроразрядные условия вокруг МКС, являются струя ксеноновой плазмы катода Plasma Contactor Unit, факелы двигателей позиционирования и ориентации и достаточно плотная собственная внешняя атмосфера станции.

Разработана расчетная методика SPEED, которая позволяет, во-первых, описать пространственное распределение параметров плазменного окружения, формирующегося при работе бортовых космических двигателей и других плазменных или газовых источников, а во-вторых, определить комбинацию геофизических и орбитальных условий, при которых интенсифицируются электроплазменные процессы вокруг МКС. Согласно методике SPEED увеличение плотности плазмы вблизи высоковольтных концов солнечных панелей приведет к увеличению отрицательного смещения потенциала поверхности станции относительно окружающей ионосферы, что в свою очередь может стимулировать возникновение искровых и дуговых разрядов на корпусе МКС.

Результаты расчетов по методике SPEED количественно согласуются с результатами экспериментальных измерений, проведенных американскими учеными.

1. Белоцерковский М. Б. и др. Некоторые экспериментальные результаты измерений параметров собственной внешней атмосферы орбитальной станции «Мир» // Космонавтика и ракетостроение.—1996.—№ 17.—С. 148—158.

2. Bering E. A., Koontz S., Katz I., et. al. The Plasma Environment of the International Space Station in the Austral Summer Auroral Zone Inferred from Plasma Contactor Data // 40th AIAA ASME. — Reno, 2002.—AIAA-2002-0935.
3. Carruth M. R. Jr, Ferguson D., Katz I., Mikaterian R., et. al. ISS and Space Environment Interactions Without Operating Plasma Contactor // 39th AIAA ASME. — Reno, 2001.—AIAA-2001-0401.
4. Ferguson D. C., Morton T. L., Hillard G. B.. First Results from the Floating Potential Probe (FPP) on the International Space Station // 39th AIAA ASME. — Reno, 2001.—AIAA-2001-0402.
5. Korsun A. G., Gabdullin F. F. Gas-Plasma Non-Uniformity Arising in Gas Releases from Spacecraft under Effect of High-Energy Space Fluxes. — 35th Joint Propulsion Conference, Los Angeles, 1999.—AIAA-99-2122.
6. Korsun A. G., Tverdokhlebova E. M., Gabdullin F. F. The Earth's Magnetic Field Effect upon Plasma Plumes Expansion // 25th International Electric Propulsions Conference. — Cleveland, 1997.—IEPC-97-178.
7. Patterson M., Verhey T., Soulas G., Zakany J. Space Station Cathode Design, Performance, and Operating Specifications // 25th International Electric Propulsions Conference. — Cleveland, 1997.—IEPC-97-170.
8. Schneider T., Carruth M., Hansen H. Minimum Arc Threshold Voltage Experiments on Extravehicular Mobility Unit Samples. // 40th AIAA ASME. — Reno, 2002.—AIAA-2002-1040.

ELECTRIC DISCHARGE PROCESSES IN THE ISS PLASMA ENVIRONMENT

Е. М. Твердохлебова, А. Г. Корсун, F. F. Gabdullin, G. F. Karabadzhak

We consider the behaviour of the electric discharges which can be initiated between constructional elements of the International Space Station (ISS) due to the electric field of high-voltaic solar arrays (HVSA). The characteristics of the ISS plasma environment are evaluated taking into account the influence of space ionizing fluxes, the Earth's magnetic field, and the HVSA's electric field. We offer the statement of the space experiment «Plasma-ISS», the aim of which is to investigate, using optical emission characteristics, parameters of the ISS plasma environment formed at operation of both the onboard engines and other plasma sources.