

АКАДЕМИЯ НАУК СССР

КОСМИЧЕСКИЕ
ИССЛЕДОВАНИЯ

Том XIII

(ОТДЕЛЬНЫЙ ОТТИСК)

5

МОСКВА · 1975

*К. И. Грингауз, В. И. Пацаев, В. А. Рудаков,
Ю. В. Ходатаев*

ОБНАРУЖЕНИЕ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ВТОРИЧНО-ЭЛЕКТРОННОГО РЕЗОНАНСНОГО РАЗРЯДА В УСЛОВИЯХ ИОНОСФЕРЫ, ЕГО ИССЛЕДОВАНИЕ И ИЗМЕРЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ НА ОРБИТАЛЬНОЙ СТАНЦИИ «САЛЮТ»

В статье описаны эксперименты по исследованию высокочастотного вторично-электронного резонансного разряда в условиях ионосферы, проведенные на орбитальной станции «Салют» в 1971 г. Приведены основные характеристики применявшейся аппаратуры и некоторые полученные результаты.

На орбитальной станции «Салют» в июне 1971 г. В. И. Пацаевым было проведено исследование высокочастотного вторично-электронного резонансного разряда.

Высокочастотным вторично-электронным резонансным разрядом называется физический процесс, при котором в высокочастотном (ВЧ) электрическом поле между электродами существует колеблющийся объемный заряд, образованный за счет вторичной электронной эмиссии с поверхности электродов [1, 2]. В литературе этот процесс называют также «вторично-электронный резонансный пробой», «мультипакторный разряд», ниже для краткости используется термин «резонансный разряд».

Резонансный разряд возникает в вакууме лавинообразно при случайном попадании электронов в межэлектродное пространство. Это явление было обнаружено в 40-х годах в таких вакуумных устройствах, как клистроны и ускорители заряженных частиц. Были выявлены основные закономерности резонансного разряда для плоских электродов в вакууме [1-4].

Упрощенно явление можно описать следующим образом. Если к плоским электродам, находящимся в вакууме (средняя длина свободного пробега электронов значительно больше межэлектродного расстояния), приложить ВЧ-напряжение, то случайно оказавшиеся между электродами электроны могут приобрести энергию, достаточную для создания вторичной эмиссии с поверхности электрода. При определенных соотношениях частоты и амплитуды ВЧ-напряжения и межэлектродного расстояния процесс приобретает лавинообразный характер. В результате между электродами создается значительная концентрация электронов. Детальное рассмотрение механизма резонансного разряда весьма сложно.

Отметим, что ВЧ-напряжение, при котором возникает разряд (критическое напряжение), зависит от материала и состояния поверхности электродов, от продолжительности разряда; на характер разряда влияет постоянное напряжение, подаваемое на электроды одновременно с ВЧ-напряжением, а также наличие заряженных частиц в окружающей среде. В ус-

ловнях вакуума увеличением постоянного напряжения удавалось подавить резонансный разряд.

Результаты лабораторных исследований позволяли предполагать, что резонансный разряд может иметь место в системах со сложной конфигурацией электродов, в частности на антеннах космических аппаратов, причем на характер разряда будут дополнительно влиять свободные электроны окружающей среды. Можно ожидать, что при этом теряется ВЧ-мощность и ухудшаются характеристики антенных систем. Однако невозможность достаточно полного моделирования в вакуумных камерах условий космического пространства и эффектов, создаваемых движением космического аппарата, не позволяла делать уверенные заключения о существовании такого процесса в условиях реального полета в космосе.

Целью описываемых в настоящем сообщении исследований являлось экспериментальное обнаружение и изучение явления резонансного разряда в условиях полета космического аппарата в ионосфере с одновременным измерением концентрации ионосферных заряженных частиц. Измерение локальной концентрации заряженных частиц в ионосфере вдоль орбиты космического аппарата, необходимое для более полного понимания результатов исследования резонансного разряда, представляет также самостоятельный интерес.

Если бы такие исследования проводились на непилотируемом космическом аппарате, то недостаточная изученность явления потребовала бы создания весьма сложной автоматической аппаратуры. Возможность непосредственного участия космонавта-исследователя в эксперименте позволила разработать и применить такую аппаратуру и программу эксперимента, которые были бы рассчитаны на активное участие экспериментатора в измерениях. Аппаратура позволяла изменять некоторые условия проведения эксперимента и при этом визуально следить за несколькими физическими характеристиками. В зависимости от наблюдаемых результатов космонавт мог изменять условия, в которых проводился эксперимент.

На первом этапе измерений предусматривалось главным образом обнаружение резонансного разряда и выявление условий его существования. На орбитальной станции «Салют» измерения были выполнены космонавтом В. И. Пацаевым, который успешно провел первые исследования резонансного разряда в ионосфере.

1. МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ И АППАРАТУРА

Исследования резонансного разряда. Резонансный разряд исследовался на электродах трех типов, формы электродов аналогичны формам применяющихся на космических аппаратах антенн, все электроды по постоянному току были изолированы от корпуса станции. В каждый данный момент использовался один из электродов, на который подавались плавно регулируемое импульсное ВЧ-напряжение и постоянное напряжение со ступенчатой регулировкой.

Прежде всего надо было зарегистрировать факт возникновения разряда. Для этого был применен измеритель ВЧ-тока разряда, основанный на увеличении проводимости среды в межэлектродном промежутке при возникновении разряда. Возможность изменения ВЧ-мощности и постоянного напряжения были необходимы для выяснения их влияния на условия возникновения и характер резонансного разряда. Для измерения распределения ВЧ-поля вблизи электродов был использован ВЧ-зонд — приемник с двумя небольшими антеннами (рамка и симметричный вибратор), установленными на штанге, которая могла перемещаться вблизи электродов. На этой же штанге была установлена ионная ловушка для измерения концентрации ионов вблизи от исследуемых электродных систем.

Измерения локальной концентрации заряженных частиц. В описываемых экспериментах измерялась концентрация положительных ионов n , ме-

тодом ионных ловушек [5]. Поскольку ионосфера электрически нейтральна и на высотах полета станции «Салют» отрицательные ионы практически отсутствуют, измерения концентрации n_1 автоматически дают значения электронной концентрации n_e .

На станции «Салют» были установлены три сферические ионные ловушки (диаметр внешнего электрода-сетки — 10 см), две из них были закреплены неподвижно и предназначались для измерений в невозмущенной среде, третья, как отмечено выше, была установлена на подвижной штанге с приемными антеннами (одновременно могли работать две из трех ловушек). При сферических ловушках результаты измерений мало зависят от ориентации ловушек относительно Солнца и вектора скорости набегаю-

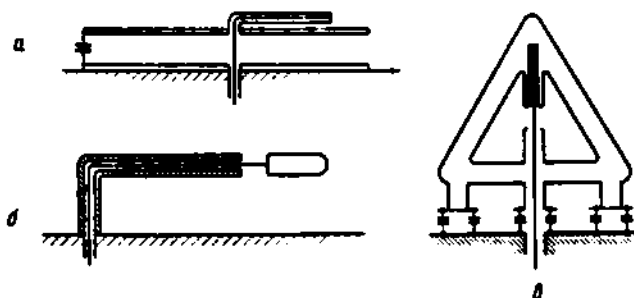


Рис. 1

щего потока частиц (до тех пор, пока ловушка не попадает в ионную тень космического аппарата). Внутренний электрод ловушки — коллектор имел отрицательный постоянный потенциал. Потенциал внешнего электрода — сетки — устанавливался экспериментатором. В случае, когда потенциал сетки изменялся по пилообразному закону, вольт-амперные характеристики коллекторного тока позволяли определять концентрацию n_1 .

Некоторые сведения об аппаратуре. Применявшиеся для исследования резонансного разряда электродные системы схематически изображены на рис. 1. Одна из них представляла собой две параллельные пластины с неравномерным распределением ВЧ-поля по периметру, аналогично щелевой антенне (рис. 1, а), размеры пластин $(0,2 \times 0,2) \lambda$; другая система — цилиндр над плоскостью, которой являлась поверхность станции (рис. 1, б); третья — комбинация цилиндров над плоскостью (рис. 1, в), размеры двух последних систем не превышали $0,25 \lambda$. По выбору экспериментатора одна из трех электродных систем, в которых наблюдался разряд, подключалась специальным переключателем к управляемому аттенюатору (0—13 дБ), регулирующему уровень ВЧ-мощности от импульсного генератора (импульсная мощность $P=300$ вт, несущая частота около 180 МГц, длительность импульса 3 мксек, частота повторения 12,5 кГц). Блок аттенюатора содержал датчики падающей и отраженной мощности.

Все измеряемые параметры регистрировались на кинолентку малогабаритным шлейфовым осциллографом. Пленки с записями были обработаны на Земле после возвращения. Кроме того, космонавт вел записи в бортовом журнале, также доставленном на Землю.

Программа работ космонавта по данному эксперименту была оформлена как часть бортового журнала. Были перечислены все основные операции и предусмотрено место для фиксирования результатов измерений, наблюдаемых эффектов и замечаний.

Первоначально описание последовательности операций было весьма подробным. Однако при подготовке космонавта выяснилось, что детальная инструкция при повторяющихся операциях не требуется, и при участии В. И. Пацаева программа была переработана. В окончательном ва-

рианте была указана лишь цель той или иной группы операций (например, «запись»), а в конце программы такие типовые операции были детально расшифрованы. Были также упрощены таблицы для вписывания результатов наблюдений в боржурнал.

Управление всеми приборами комплекса и индикация измеряемых параметров сосредоточены в одном приборе — блоке управления, при помощи которого космонавт и осуществлял эксперимент, наблюдая за его ходом.

В блоке управления, в частности, находились релейные схемы управления приводом аттенюатора ВЧ-мощности, приводом подвижной штанги, ВЧ-переключателями электродов, управление различными режимами записи. Состояние управляемых узлов контролировалось световыми индика-

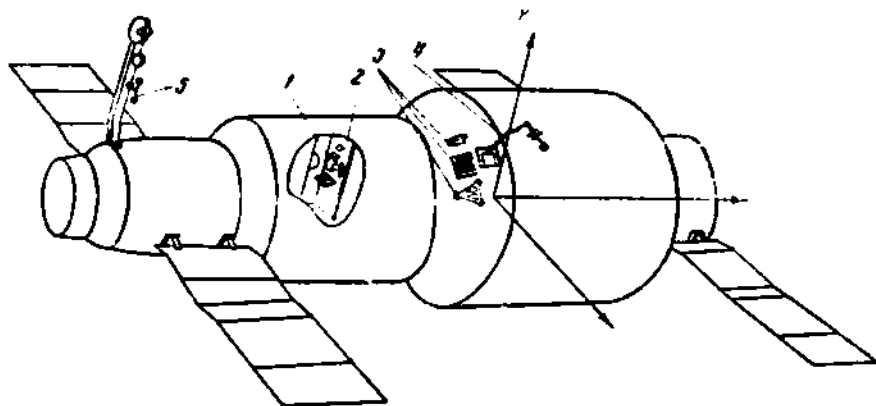


Рис. 2

1 — блок управления, 2 — регистратор, 3 — исследуемые электродные системы, 4 — подвижная штанга с приемными антеннами и ионной ловушкой, 5 — неподвижные ионные ловушки

торами, в качестве которых использовались световые диоды красного и зеленого цвета.

Все измеряемые токи и напряжения, прежде чем попасть на шлейфы осциллографа или стрелочный прибор, усиливались специальными усилителями, находящимися также в блоке управления. Там же находился измерительный приемник со ступенчатым аттенюатором на входе. Усилители зондовых токов позволяли измерять токи в диапазоне от 10^{-10} до 10^{-3} а, разбитом на несколько поддиапазонов. Значения всех измеряемых параметров можно было визуально наблюдать на трех стрелочных приборах, которые по выбору экспериментатора могли включаться в различные цепи. Зондовые характеристики ионных ловушек можно было наблюдать на экране электронно-лучевой трубки. По виду вольт-амперной характеристики на экране экспериментатор мог выбрать оптимальный режим усиления. Угол наклона подвижной штанги регистрировался при помощи стрелочного прибора, подключенного к потенциометрическому датчику.

Несмотря на большую насыщенность лицевой панели блока управления органами управления и контроля, обращение с прибором не вызывало особых трудностей у экспериментатора в процессе тренировки. В записях, сделанных В. И. Пацаевым на борту станции «Салют», также нет замечаний о трудностях работы с прибором.

Аппаратура позволяла после выбора соответствующей программы регистрировать в автоматическом режиме несколько физических зависимостей, а также осуществлять измерения через определенные интервалы времени.

На рис. 2 схематически показано размещение элементов аппаратуры на станции «Салют».

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

С описанной выше аппаратурой на борту станции «Салют» космонавтом В. И. Пацаевым был проведен ряд экспериментов в период с 16 по 27.VI 1971 г. Записи В. И. Пацаева в бортовом журнале и доставленные на Землю осциллографические пленки позволили восстановить ход экспериментов. В. И. Пацаев провел восемь сеансов измерений продолжительностью от 15 до 90 мин. В общей сложности при проведении описываемых экспериментов протяжка пленочного осциллографа включалась 202 раза, каждая запись фиксировала от одного до нескольких десятков циклов измерений. В зависимости от реальной обстановки В. И. Пацаев корректировал намеченную на Земле программу измерений. Некоторые эксперимен-

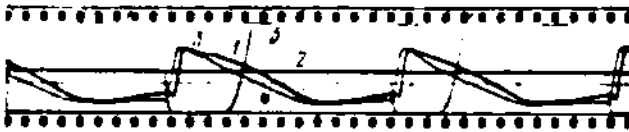


Рис. 3. Осциллограмма с регистрацией возникновения резонансного разряда, полученная 25.VI 1971 г. в 23 час 30 мин московского времени

1 — ток разряда, 2 — постоянное напряжение на электроде (здесь +3,5 в), 3 и 4 — мощность падающей и отраженной волны соответственно (росту этих величин соответствует уменьшение уровней на осциллограмме), 5 — метки времени через 1 сек

ты проведены во время, отведенное для отдыха космонавта, что говорит о его интересе к проводимым исследованиям.

Все измерения проведены при вращении станции вокруг направленной от Солнца оси Y (перпендикулярной продольной — большой оси станции) с угловой скоростью около 3 град/сек, при этом ВЧ-электроды и ионные ловушки всегда были затенены корпусом станции от прямого освещения солнечными лучами, следовательно, фотоэмиссия с электродов ловушек отсутствовала.

Одним из основных результатов экспериментов является первое обнаружение существования резонансного разряда на электродах, установленных на поверхности космического корабля во время его полета в ионосфере. На рис. 3 воспроизведена одна из снятых В. И. Пацаевым осциллограмм, на которой зафиксирован процесс возникновения резонансного разряда. По мере увеличения высокочастотного напряжения (с ростом падающей и отраженной мощностей) возникает и возрастает ток разряда, уровень которого выходит за пределы поля записи. (Значения падающей и отраженной мощностей записаны в различных масштабах и записи сдвинуты относительно друг друга на 2 мм по горизонтали.) На осциллограмме рис. 3 отчетливо видно повторяющееся возникновение высокочастотного вторично-электронного резонансного разряда.

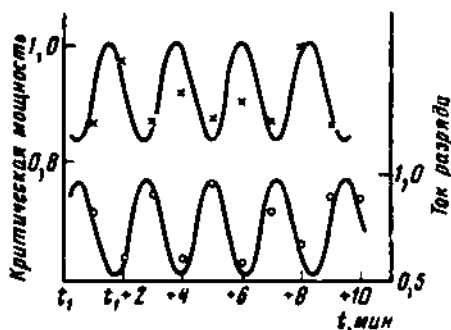
При вращении станции вокруг оси Y ориентация различных участков ее поверхности относительно вектора скорости (направления набегающего потока ионосферной плазмы) непрерывно меняется, причем возможно попадание высокочастотных электродов в газодинамическую тень станции. Влияние этого затенения выявилося в серии из 20 измерений с интервалом в 1 мин. Каждое измерение состояло из трех циклов изменения высокочастотной мощности, длительность одного цикла 2 сек. В интервалах между измерениями значение мощности было минимальным, при этом разряд отсутствовал. Измерения проводились на дневном участке орбиты. Оказалось, что значения критической мощности и тока разряда меняются в зависимо-

сти от изменения положения станции относительно вектора набегающего потока плазмы. На рис. 4 приведены в относительном масштабе изменения во времени максимальных значений тока разряда и значений критической мощности. На этом же графике нанесены сплошными линиями синусоиды, период которых соответствует периоду вращения станции. Влияние этого вращения на разрядный ток выражено достаточно отчетливо.

Отметим, что двухэлектродный высокочастотный вторично-электронный резонансный разряд был зарегистрирован на системе плоских электродов (рис. 1, а).

Измерения концентрации положительных ионов проводилось на нескольких участках полета. Экспериментатор должен был по виду вольт-

Рис. 4. Максимальные значения тока разряда (точки) и значения критической мощности (кресты), измеренные с интервалом 1 мин 28.VI 1971 г. в 11 ч. 35 м. московского времени. По вертикали — масштаб относительный. Период сплошной синусоидальной кривой соответствует периоду вращения станции



амперной характеристики на экране электронно-лучевой трубки выбрать оптимальный режим измерений.

Анализ записей показал, что зондовые усилители блока управления работали не вполне нормально (этих отклонений в работе прибора В. И. Пацаев видеть не мог, они сказывались только на записи). Тем не менее на некоторых участках получены поддающиеся дешифровке зондовые характеристики. Такие записи получены, например, 16.VI 1971 г. на отрезке орбиты длиной примерно 3000 км. Измерения начались в районе терминатора, незадолго до вхождения станции в тень. Высота полета была 250 км, широта изменялась от 42 до 50° ю. ш. Полученные данные приведены в таблице 1 (расстояния со знаком минус соответствуют освещенному Солнцем участку орбиты).

Расстояние от терминатора, км	$n_1, 10^8 \text{ см}^{-3}$	Расстояние от терминатора, км	$n_1, 10^8 \text{ см}^{-3}$	Расстояние от терминатора, км	$n_1, 10^8 \text{ см}^{-3}$
-500	1,6	750	1,35; 1,35	1750	0,85
-25	1,8; 1,55	1000	1,25; 1,2; 1,25; 1,2	2000	0,85
250	1,55; 1,55	1250	1,25; 1,35	2250	0,85; 0,75; 0,85
500	1,45; 1,35; 1,35	1500	0,85; 1,0; 0,85	2500	0,85; 0,85

В этих измерениях наряду с полученными данными интерес представляет сам факт успешных ионосферных измерений при помощи управляемого космонавтом прибора. В бортовом журнале отсутствуют какие-либо замечания о трудностях измерений. Таким образом, проверена работоспособность устройства, позволяющего измерять концентрацию ионов в сложных условиях, которые могут возникнуть при исследовании резонансного разряда, при необходимости существенного изменения диапазона измеряемых значений концентрации и потенциалов на электродах ловушек.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1) Обнаружен высокочастотный вторично-электронный резонансный разряд на электродах вблизи поверхности летящей в ионосфере орбитальной станции.

2) Высокочастотный ток разряда и мощность, при которой разряд возникает, зависят от ориентации станции относительно вектора ее скорости и меняются при переходе с ночной части орбиты на дневную.

На электродах открытого типа (см. рис. 1, б, в) при малых постоянных напряжениях резонансный разряд не наблюдался, при постоянных напряжениях более 20 в наблюдался самостоятельный разряд.

В настоящей статье приведена часть полученных результатов. Не описаны влияние на разряд постоянного потенциала на электродах, зависимость характера разряда от его длительности, влияние разряда на импеданс электродов. Частично методика измерений и их результаты излагались в [6, 7].

Дата поступления
6 июня 1974 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. E. W. Gill, A. von Engel. Proc. Roy. Soc., A192, 446, 1948.
 2. A. J. Hatch, A. B. Williams. J. Appl. Phys., 25, 417, 1954.
 3. Б. А. Засер, В. Г. Тишин. ЖТФ, 34, 297, 1964.
 4. И. Н. Славков и др. Электрический пробой и разряд в вакууме. М., Атомиздат, 1966.
 5. К. Н. Грингауз, В. В. Безруких, В. Д. Озеров. Сб. «Искусственные спутники Земли», вып. 6. М., Изд-во АН СССР, 1961, стр. 63.
 6. «Салют» на орбите (Сб. под ред. М. П. Васильева). М., «Машиностроение», 1973.
 7. К. Н. Грингауз, В. И. Нацаев, В. А. Рудаков, Ю. В. Ходатаев. Доклад на XXIV астронавтическом конгрессе, Баку, 1973 г.
-