

МАГНИТОРАЗРЯДНЫЕ ДАТЧИКИ НЕЙТРАЛЬНОЙ КОМПОНЕНТЫ ПЛАЗМЫ ДЛЯ КОСМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Приведены несколько вариантов конструкции датчиков нейтральной компоненты плазмы для измерения параметров разреженной газовой среды в условиях космического полета. Исследования проводились с целью уменьшения габаритов и массы датчиков. Представлены результаты испытаний экспериментальных и опытных образцов и их основные характеристики.

Наведено декілька варіантів конструкції датчиків нейтральної компоненти плазми для вимірювання параметрів розрідженого газового середовища в умовах космічного польоту. Дослідження проводились з метою зменшення габаритів і маси датчиків. Представлено результати випробувань експериментальних і дослідних зразків і їх основні характеристики.

Various embodiments of plasma neutral component sensors for onboard characterization of the rarefied space plasma are presented. The study has been aimed at reducing both the size and the mass of the sensors. Test results for experimental and pre-production sensor models and their key performance characteristics are given.

На высотах (200 – 1000) км атмосфера Земли представляет собой квазинейтральную разреженную низкотемпературную плазму, многокомпонентную как по химическому составу, так и по энергетическим состояниям (нейтральные атомы, ионы, возбужденные атомы и молекулы) [1]. Концентрация частиц уменьшается с увеличением высоты и существенно зависит от солнечной активности и геофизических факторов. К настоящему времени разработано большое количество магниторазрядных датчиков давления, используемых в различных целях [2]. Принцип действия инверсно-магнетронного преобразователя (ИМП) основан на явлении возникновения в его рабочей камере самостоятельного газового разряда в скрещенных электрическом и магнитном полях. Ток разряда ИМП в широком диапазоне давлений имеет линейную зависимость от концентрации молекул внутри ИМП и параметров разреженной внешней газовой среды. Высокая степень ионизации газа, широкий диапазон измерений и отсутствие накальных элементов определяют высокие эксплуатационные характеристики ИМП. Они надежны, просты в эксплуатации и допускают длительную работу в условиях космоса.

Для космических экспериментов разрабатывались специальные датчики давления. Известны магниторазрядные преобразователи, разработанные в Центральном научно-исследовательском институте робототехники и технической кибернетики (Санкт-Петербург). Так, магнетронный преобразователь МЭРИ-5 использовался на спутниках в качестве высотомера Альфа-1М (70 – 100 км) для раскрытия парашюта. Преобразователь выполнен по схеме магнетрона. Его корпус, находящийся под нулевым потенциалом, является анодом, а на катод подается высокое отрицательное напряжение. Масса преобразователя составляет 0,48 кг. Максимальная потребляемая мощность не более 2 Вт. Разработки магнитных преобразователей также выполнялись по схеме инверсного магнетрона. Преобразователь «Индикатор» имеет диапазон рабочих давлений $10^{-2} - 10^{-6}$ Па, погрешность 30%, назначенный ресурс 1200 ч, потребляемую мощность 20 Вт, массу 5 кг и цифровой выход. Для контроля плотности среды на международной космической станции (МКС) разработан инверсно-магнетронный преобразователь. В состав прибора входят пульт для работы космонавта на борту МКС и выносной блок. Для повышения надежности и увеличения объема анализируемой информации в приборе предусмотрено

© С. Н. Кулагин, 2013

два канала измерения. Диапазон рабочих давлений от 10^{-6} до 10^{-2} Па. [3, 4].

В отделе механики ионизированных сред Института технической механики Национальной академии наук Украины и Государственного космического агентства Украины разработан и исследован ряд датчиков нейтральной компоненты плазмы (НКП), различающихся по конструкции и выходным параметрам. Основной целью являлось последовательное снижение габаритов и массы датчиков при сохранении возможности определения параметров направленных потоков разреженного газа.

Первым в рамках проекта NN-38 Украинского научно-технологического центра (УНТЦ) был разработан датчик НКП-1, предназначенный для использования на борту наноспутника для международной космической станции [5, 6]. Газ в камеру ионизации поступал через входной канал, образованный внутренней поверхностью трубки. Схема ИМП с закрытой камерой ионизации в качестве чувствительного элемента представлена на рис. 1. Конструкция включала в себя: корпус 1; постоянный магнит 2; гайки 3, 4, 15; электрод (анод) 5; изолятор 6; электрический вывод 7; кожух магнитов 8; наружный магнитный экран 9; входную трубку 10; полюсный наконечник 11; внутренний магнитный экран 12; датчик температуры 13; разрядную камеру 14; диафрагму 16. ИМП имел следующие габаритные размеры: внешний диаметр 50 мм, длина 85 мм, диаметр входного отверстия трубки 7 мм, длина входного канала трубки 10 мм. Двойной корпус ИМП выполнял одновременно функции теплозащитного и магнитного экранов. Конструкция датчика предусматривала использование двух ИМП, входная трубка одного из которых совпадала с направлением вектора набегающего потока, а у второго была ориентирована перпендикулярно вектору набегающего потока. Масса датчика без блока питания составляла 1,2 кг.

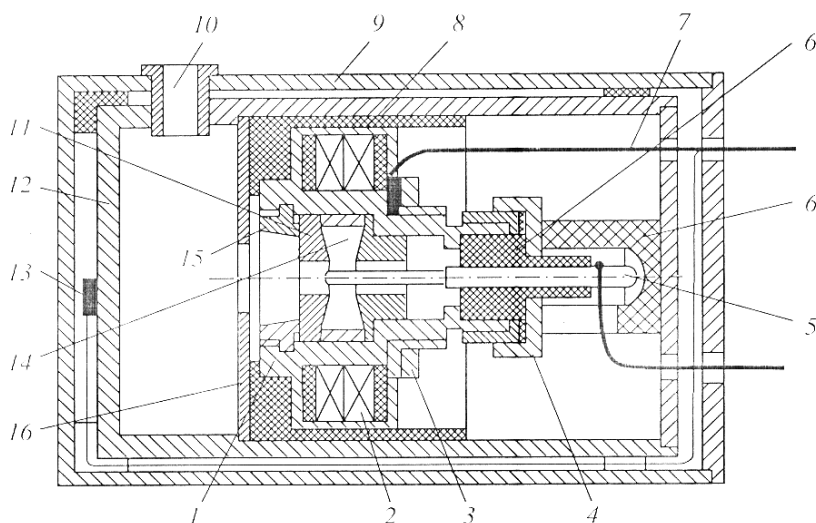


Рис. 1

Недостатком датчика является относительная сложность конструкции, поэтому при разработке датчика НКП-2 для КА «Сич-2» [7] некоторые элементы магнитной системы и узлов крепления были существенно упрощены.

Конструктивная схема ИМП датчика НКП-2 (см. рис. 2) включала в себя: магнитный экран с входным отверстием 1; гайку накидную 2; стакан 3; магнит 4; изолятор 5; винт стопорный 6; крышку магнитного экрана нижнюю 7; колпак 8; гайку 9; винт нижний 10; концентраторы магнитные 11; штифт 12; анод 13; крышку магнитного экрана верхнюю 14.

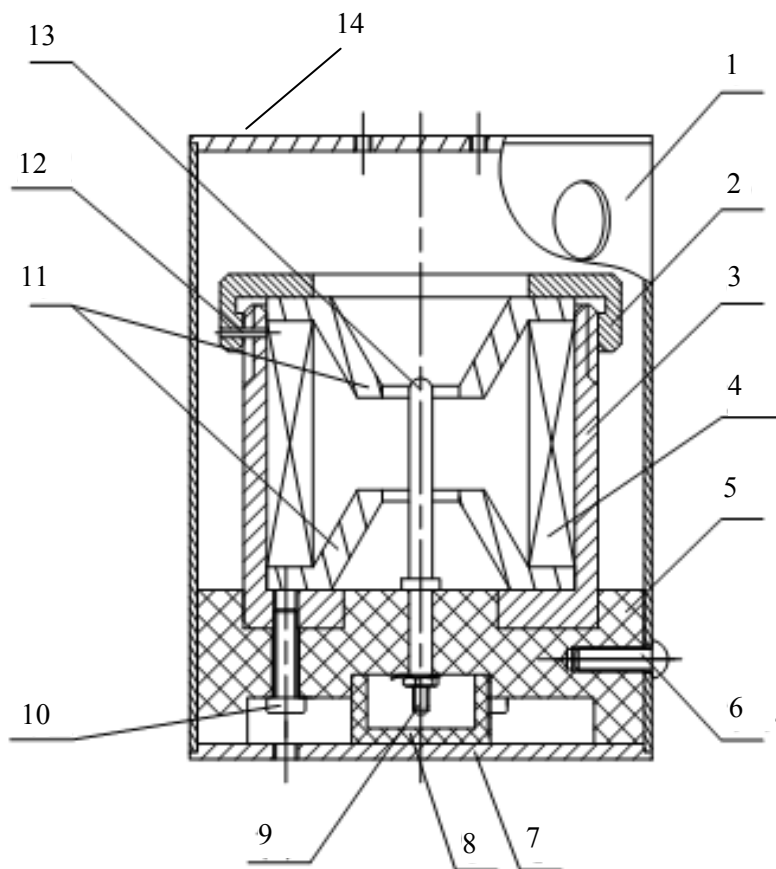


Рис. 2

Конструкция датчика предусматривала использование двух ИМП, смонтированных внутри общего кожуха, выполнявшего функции дополнительного магнитного экрана, при этом нормали к апертурам входных отверстий ИМП взаимно ортогональны. Общая масса датчика с блоком питания составляла 2,16 кг. Летный образец датчика успешно эксплуатировался в составе комплекса научной аппаратуры на борту КА «Сич-2».

В рамках проекта № 5567 УНТЦ был разработан усовершенствованный датчик НКП-3 с уменьшенными габаритами и массой. Этого удалось достичь благодаря использованию общей для двух ИМП магнитной системы с радиальными магнитными полями в зонах разрядов. Катоды ИМП идентичны по конструкции и включают в себя две обечайки, наружную и внутреннюю.

Конструктивная схема датчика (см. рис. 3) включает следующие основные элементы: крышку 1; изолятор внутренний 2; катод внутренний 3; газопровод наружный 4; экран магнитный 5; изолятор анода 6; газоподвод внутренний 7; прокладку уплотнительную 8; анод внутренний 9; анод наружный

10; полюс магнитный 11; магниты постоянные 12, 13, 14; катод наружный 15; изолятор наружный 16; магнитопровод 17; обечайку внутреннюю 18; обечайку наружную 19; стакан 20. Масса датчика без блока питания составляет 0,78 кг.

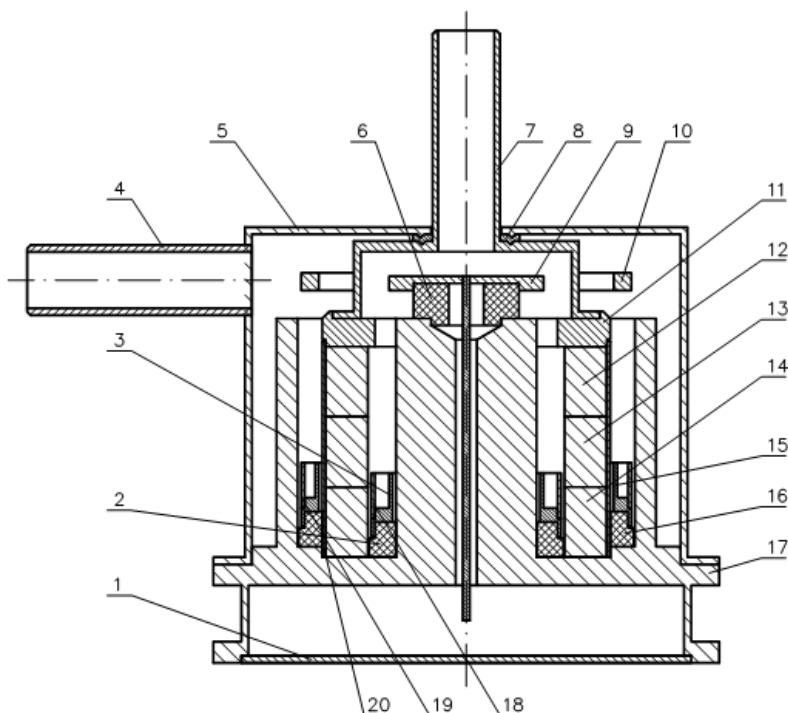


Рис. 3

Конструкция датчика предусматривает возможность осевого перемещения катодов, что позволяет оперативно изменять расстояние между анодом и катодом с целью получения максимально возможного (при заданном напряжении) тока разряда. Экспериментальные исследования показали, что оптимальным является «верхнее» расположение катодов, при котором верхний срез катодов совпадает с верхним срезом магнитопровода.

Недостатком датчика является различие геометрии и объема разрядных камер ИМП, что приводит к различию токов разряда, однако при наличии соответствующих калибровочных зависимостей, получаемых в результате наземной отработки, данный недостаток не является существенным, так как не влияет на интерпретацию результатов измерений.

Дальнейшим развитием работ по улучшению эксплуатационных характеристик стала разработка датчика НКП-4 для КА «Микросат». Конструкция датчика (см. рис. 4) состояла из следующих элементов: кольцевых магнитов 1, 2; магнитопровода 3; входного патрубка верхнего преобразователя 4; магнитного экрана 5; анода внешнего (кольцевого) 6; изоляторов 7, 8, 10; анода внутреннего 9; поджигного электрода 11 (позиции приведены для нижнего преобразователя, входной патрубков нижнего преобразователя условно не показан).

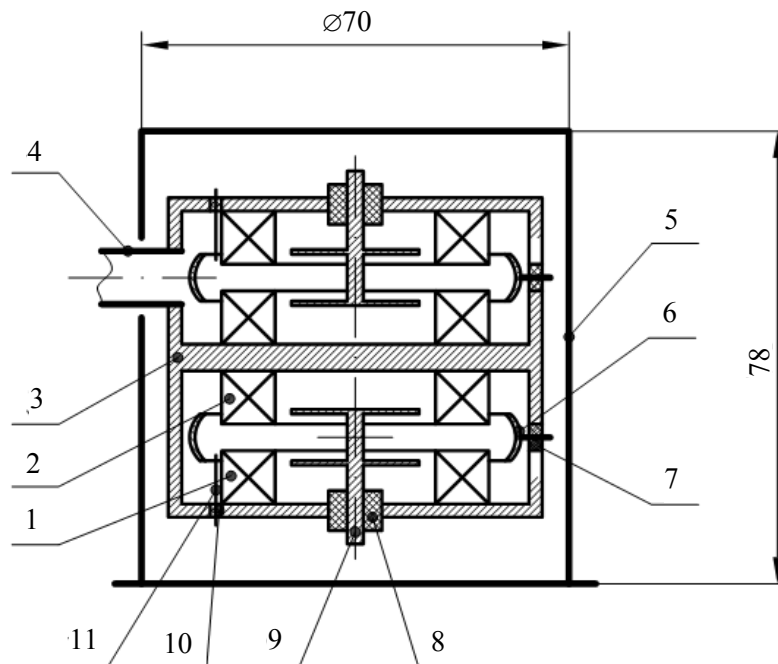


Рис. 4

В датчике использовалась общая замкнутая магнитная система, при этом полярность магнитов выбрана таким образом, что внешние магнитные поля преобразователей направлены навстречу друг другу и взаимно компенсируются, остаточное поле экранирует магнитный экран. Такая схема позволяет минимизировать влияние датчика на расположенные вблизи приборы, например магнитометры. Входные патрубки преобразователей направлены ортогонально. Преобразователи идентичны по конструкции и включают в себя два анода (внутренний и внешний) и общий катод, образованный поверхностями магнитов. Разряд, горящий между внешним анодом и катодом, соответствует режиму магнетрона, разряд между внутренним анодом и катодом соответствует режиму инверсного магнетрона. С целью повышения чувствительности преобразователя, номиналы балластных резисторов в цепях анодов подобраны таким образом, чтобы между анодами была разность потенциалов, препятствующая уходу ионов из зоны внутреннего разряда, при этом увеличивается давление и ток внутреннего разряда. Токи разрядов складываются в измерительной цепи, дополнительно увеличивая чувствительность преобразователя. Для надежного поджига разряда при сверхнизких давлениях преобразователи снабжены поджигными электродами. Масса датчика с блоком питания составляет 1,2 кг.

С целью дальнейшего снижения массы и габаритов разработан датчик НКП-5, в конструкции которого использованы малогабаритные магниты. Датчик включает в себя два отдельных преобразователя, смонтированных на пластине, размеры которой соответствуют посадочным размерам блока питания датчика НКП-4. Конструкция, принцип работы и схема включения преобразователей аналогичны датчику НКП-4, различия заключаются в конструкции узлов крепления анодов. В состав схемы преобразователя (см. рис. 5) входят следующие детали: изоляторы 1, 3, 10; анод внутренний 2; фланец 4;

экран магнитный 5; анод внешний 6; магниты 7, 8; трубка входная 9. Масса датчика без блока питания составляет 0,15 кг.

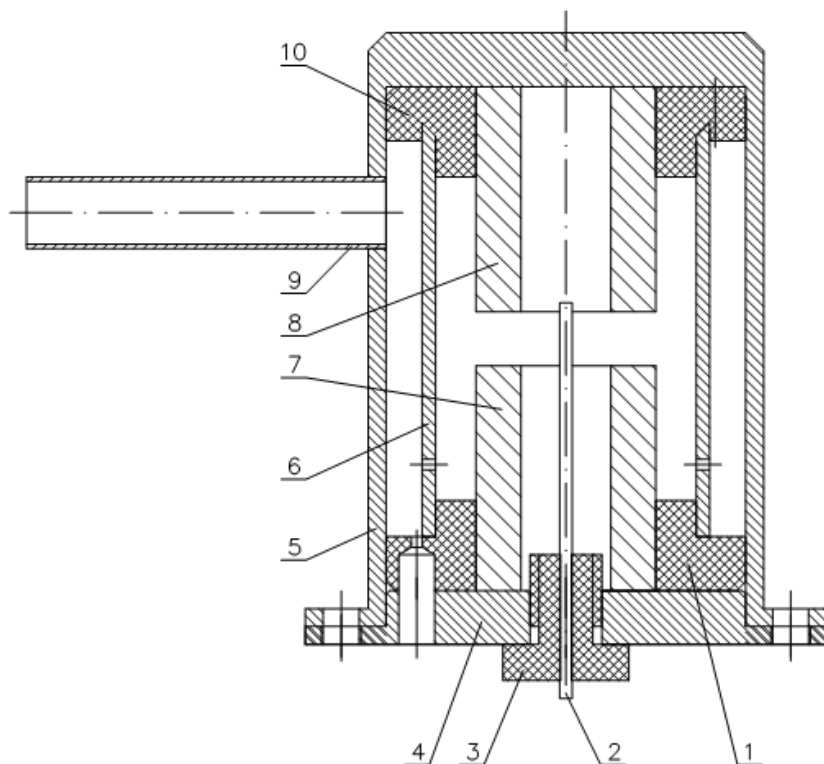


Рис. 5

Общий вид разработанных датчиков приведен на рис. 6. Слева направо: НКП-2 с блоком питания на базе преобразователя Brandenburg (эксплуатировался на борту КА «Сич-2»), НКП-4 с блоком питания на базе преобразователей ЭМКО (разработан для КА «Микросат», проект «Ионосат»), НКП-5 (без блока питания).

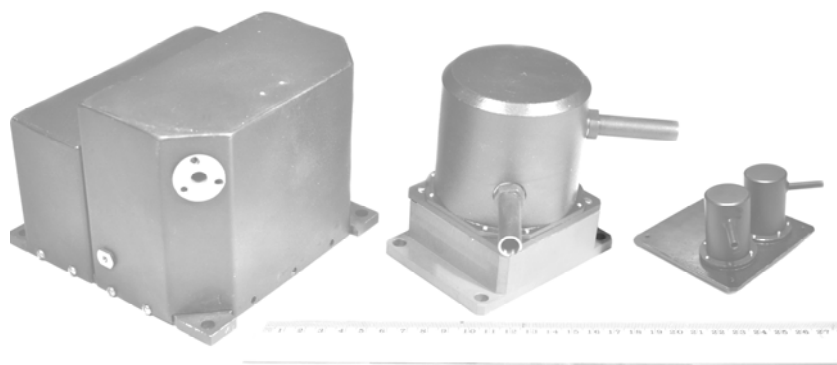


Рис. 6

Испытания датчиков проводились на плазмодинамическом стенде в вакуумной камере объемом 6 м³, оснащенной электродуговым вакуумным насосом. В результате проведенных испытаний были получены основные эксплуатационные характеристики датчиков. На рис. 7 приведены зависимости

токов разряда преобразователей от давления в вакуумной камере для различных НКП при $U = 3$ кВ. Сравнительный анализ характеристик показывает, что при прочих равных условиях уменьшение массы датчиков приводит к снижению тока разряда. Из рис. 7 видно, что ток разряда датчика НКП-5 в три раза меньше, чем у датчика НКП-4. Это обстоятельство может затруднить поджиг разряда при сверхнизких давлениях. Данный недостаток можно устранить увеличением рабочего напряжения. Современная элементная база позволяет это сделать без существенного увеличения массы блока питания.

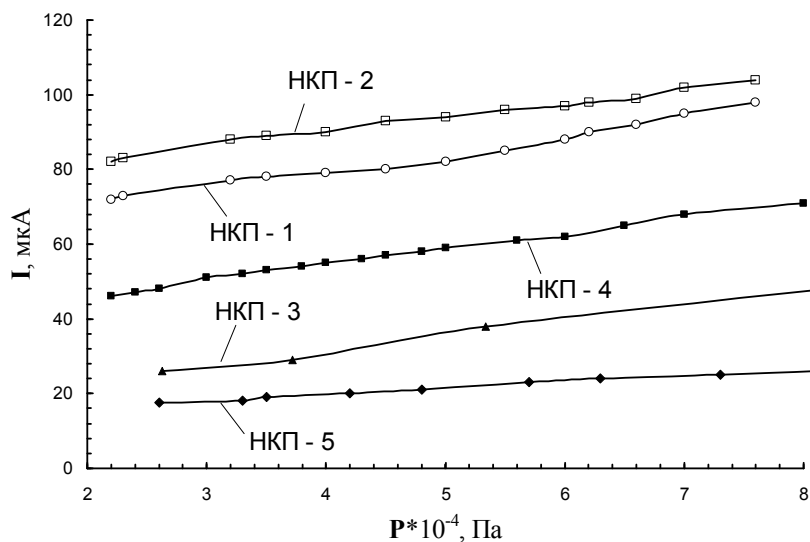


Рис. 7

При оценке параметров околоспутниковой среды существенное влияние на показания датчиков может оказывать собственная воздушная атмосфера (СВА) космического аппарата. С целью уменьшения воздействия этого фактора длина входных патрубков датчиков НКП-3 и НКП-4 увеличена до 50 мм. Это позволило вынести передний срез входного патрубка преобразователя «набегающего» потока датчика НКП-4 за пределы рабочей платформы КА «Микросат». В перспективе для дальнейшего уменьшения влияния СВА датчик необходимо размещать на выносной штанге, габариты и масса датчика НКП-5 позволяют это сделать.

Для оценки чувствительности датчиков к направлению потока газа (применительно к космическому полету «набегающий» поток) исследовалась зависимость тока разряда преобразователей датчиков от угла поворота входного патрубка относительно потока азота. В качестве характерного примера на рис. 8 приведены данные для НКП-4: зависимость тока разряда преобразователя датчика НКП-4 от угла поворота входного патрубка относительно потока азота при $P = 6 \cdot 10^{-4}$ Па (скорость потока $V \approx 600$ м/с).

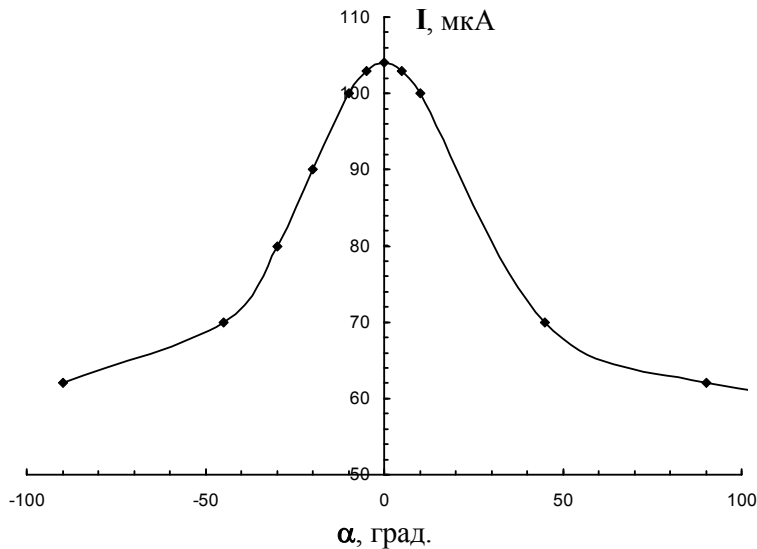


Рис. 8

Из рис. 8 видно, что при изменении угла на 90° (от «набегающего» до «скользящего» потока) ток разряда изменяется в два раза, что свидетельствует о возможности адекватного измерения разности концентраций нейтральных частиц.

Заключение. В результате проведенных исследований разработан ряд датчиков НКП с уменьшенными габаритами и массой, пригодных для использования в космических исследованиях.

1. Шувалов В. А. Моделирование взаимодействия тел с ионосферой / В. А. Шувалов / – Киев : Наукова думка, 1995. – С. 180.
2. Розано Л. Н. Вакуумметр ВМ-11М для измерения давления в диапазоне 10^{-2} - 10^{-11} Па / Л. Н. Розано, В. Л. Сухано, В. А. Христенко // Вакуумная техника и технология. – 2005. – Т.15. № 2. – С. 89 – 98.
3. Исследование параметров разреженной газовой среды на орбитальных космических аппаратах / В. Д. Котенев, Б. А. Рабинович, Л. Н. Разанов, В. А. Чебыкин // Вакуумная техника и технология. – 2010. – Т. 20. №3. – С. 185 – 189.
4. Исследование плотности и состава верхней атмосферы / В. Д. Котенев, Л. О. Незнамова, В. П. Пылев, Б. А. Рабинович, Л. Н. Разанов // Вакуумная техника и технология. – 2009. – Т. 19. №3. – С. 123 – 132.
5. Инверсно-магнитный преобразователь для диагностики потоков частично ионизованного газа / В. А. Шувалов, А. И. Приймак, А. Е. Чурилов, Н. П. Резниченко // ПТЭ. – 2001. – Т. 44. № 2. – С. 106.
6. Контактная диагностика высокоскоростных потоков разряженной плазмы / В. А. Шувалов, Г. С. Кочубей, А. И. Приймак, Н. А. Токмак, Д. Н. Лазученков, Н. П. Резниченко // Теплофизика высоких температур. – 2005. – Т. 43, № 2. – С. 1 – 9.
7. Моделирование зондовых измерений параметров околоспутниковой плазмы на КА «СИЧ-2» / В. А. Шувалов, В. Е. Корепанов, А. А. Лукенюк, Н. А. Токмак, Г. С. Кочубей // Космическая наука и технология. – 2012. – Т. 18. № 6. – С. 5 – 13.

Институт технической механики
НАН Украины и ГКА Украины,
Днепропетровск

Получено 20.06.13,
в окончательном варианте 25.06.13