

что степень преобразования энтальпии продуктов сгорания в электроэнергию на одном Т-слое может составить $\sim 10\%$.

Поступила 1 I 1982

ЛИТЕРАТУРА

1. Тихонов А. Н., Самарский А. А. и др. Нелинейный эффект образования самоподдерживающегося высокотемпературного электропроводящего слоя газа в нестационарных процессах магнитной гидродинамики. — ДАН, 1967, т. 173, № 4.
2. Дегтярев А. М., Захлязьминский Л. А. и др. Развитие конечных локальных возмущений электропроводности в потоке слабопроводящего газа в присутствии магнитного поля. — ТВТ, 1969, т. 7, № 3.
3. David A. Oliver. Time dependent phenomena in magnetohydrodynamic generators. — В кн.: Докл. I советско-американского коллоквиума по МГД-преобразованию энергии. М.: изд. ИВТ АН СССР, 1974.
4. Славин В. С., Соколов В. С., Деревянко В. А. Высокоэффективный МГД-генератор, использующий газоплазменные потоки с крупномасштабными неоднородностями. — В кн.: Теплофизические вопросы прямого преобразования энергии. Киев: Наукова думка, 1979.
5. Деревянко В. А., Славин В. С., Соколов В. С. Магнитогидродинамический генератор электроэнергии на продуктах газификации бурых углей. — ПМТФ, 1980, № 5.
6. Соснин Н. В., Фаворский А. П. Установившиеся магнитогидродинамические структуры Т-слоя. М.: Препринт ИПМ АН СССР, 1976, № 64.
7. Каменщиков В. А., Пластинин Ю. А. и др. Радиационные свойства газов при высоких температурах. М.: Машиностроение, 1971.
8. Саттон Дж., Шерман А. Основы технической магнитной газодинамики. М.: Мир, 1968.

УДК 533.6.011.8

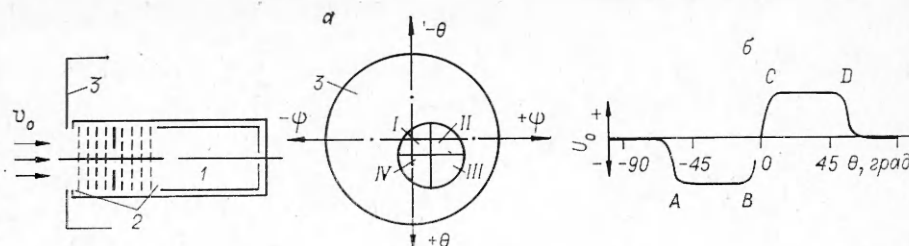
ИССЛЕДОВАНИЕ УГЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ИОННЫХ ДАТЧИКОВ ОРИЕНТАЦИИ В ЛАБОРАТОРНЫХ УСЛОВИЯХ

В. Ф. Антонов, В. В. Скворцов, А. А. Успенский
(Москва)

Одним из главных режимов управления движением космического летательного аппарата является управление его ориентацией, так как оно предшествует всем другим режимам (коррекции, спуску). В частности, большое значение имеет обеспечение стабилизации аппарата относительно осей координат, связанных с вектором скорости полета. Для осуществления этой операции используются датчики различных типов, одним из которых является ионный датчик ориентации, регистрирующий количество ионов верхней атмосферы, попадающих в соответствующее приемное устройство [1, 2].

Составными частями датчика этого типа являются чувствительный элемент (ЧЭ), воспринимающий ионы набегающего потока, и блок электроники, осуществляющий преобразование сигналов с ЧЭ в сигналы для управляющих двигателей аппарата, пропорциональные углу отклонения оси чувствительного элемента от направления вектора скорости полета аппарата.

В исследованном варианте чувствительный элемент ионного датчика представлял собой полую трубку, внутри которой размещаются (фиг. 1, а): коллекторный стакан I в виде цилиндра диаметром 40 мм и длиной 70 мм,



Фиг. 1

разрезанного по образующим на четыре одинаковые секции, и пакет сеток 2 с диафрагмой, которые обеспечивают формирование потока ионов диаметром 20 мм на коллектор, отсеку электронов из окружающего пространства, модуляцию ионов с фиксированной частотой (для обеспечения усиления коллекторного тока), подавление динаatronного эффекта из коллектора. Диаметр лобовой поверхности 3 исследованного варианта датчика равен ~ 110 мм. Из-за конструктивных особенностей входное отверстие ЧЭ смещено относительно центра лобовой поверхности на 15 мм. Электроды пакета 2 представляют собой сетки, у которых размер ячеек равен $0,8 \times 0,4$ мм, а диаметр прутка 30 мкм. Расстояние между сетками примерно 0,7 мм.

Принцип действия датчика основан на том, что при изменении ориентации аппарата (и соответственно жестко связанного с ним датчика ориентации) либо по курсу, либо по тангажу происходит перераспределение потока ионов на коллекторы, на основании которого электронная система вырабатывает сигнал в комплекс управления ориентацией аппарата.

Выбор ионного компонента ионосферы основан на высокой направленности потока этих частиц в системе координат, связанной с аппаратом, движущимся со скоростью v_0 , которая удовлетворяет условию $v_0 \gg \sqrt{2kT_i/M_i}$, где T_i и M_i — температура теплового движения и масса ионов соответственно, k — постоянная Больцмана.

Основным достоинством ионных датчиков ориентации является малое время реакции (доли секунды) на изменение углового положения. Поэтому с помощью такого датчика возможна быстрая ориентация аппарата по вектору скорости полета.

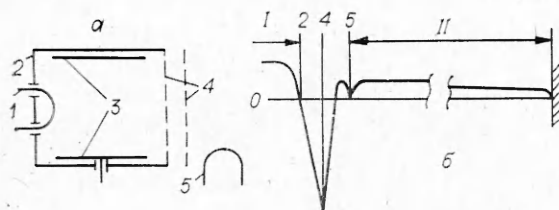
Зависимость выходного сигнала U_θ (или U_ψ) датчика от угла поворота (угловая характеристика) в плоскости тангажа θ показана на фиг. 1, б (в плоскости курса ψ она имеет аналогичный вид). Линейная часть характеристики BC используется для ориентации летательного аппарата, а участки AB и CD — для «захвата» набегающего потока ионов. Сумма всех участков (AD) является зоной обзора датчика. Величина выходного сигнала на линейном участке BC изменяется в пределах ± 6 В и сохраняется на этом уровне на участках насыщения AB и CD .

В реальных условиях на работу ионного датчика ориентации могут оказывать влияние различные внешние факторы: появление потенциала на корпусе аппарата при работе основного и корректирующих двигателей, образование «подушки» из нейтральных частиц перед лобовой поверхностью аппарата и т. п. Эти изменения внешних условий могут приводить к искажению траекторий движения ионов набегающего потока вблизи аппарата и обуславливать изменение выходных сигналов датчика. Поэтому большое значение имеет возможность моделирования влияния различных факторов на угловую характеристику датчика в контролируемых лабораторных условиях, так как такие исследования в полете осуществить значительно сложнее.

Для проведения подобных исследований необходимо создание потока разреженной плазмы, параметры которой по концентрации заряженных частиц, их скоростям, температурам были бы близки к натурным.

Такие условия реализованы в ионосферной аэродинамической трубе [2, 3], которая представляет собой вакуумную камеру диаметром 1,5 м и длиной около 10 м. Внутри ее размещаются источник потока синтезированной плазмы, координатная система, объект исследования и средства диагностики параметров потока. Система вакуумных насосов обеспечивает поддержание в камере при работающем источнике давление на уровне $1 \cdot 10^{-3}$ Н/м².

Поток синтезированной плазмы генерируется источником с ионизацией атомов рабочего вещества, в качестве которого используется газ — азот, электронным ударом [4, 5] (фиг. 2, а). Процесс получения потока ионов состоит в следующем. В разряде между катодом 1 и анодом 3 в камере ионизации 2 образуется плазма, потенциал которой близок к потенциалу анода. С помощью ионно-оптической системы (ИОС) 4 осуществляется



Фиг. 2

ускорение ионов из камеры ионизации. Поток разреженной плазмы, в котором воспроизводятся условия полета в ионосфере по основным параметрам, создается в результате синтеза ускоренных ионов струи с электронами, эмиттируемыми накаленной вольфрамовой нитью 5.

Как видно из распределения потенциала по длине (фиг. 2, б), энергия ионов в потоке будет определяться разностью потенциалов плазмы в камере ионизации I и в потоке синтезированной плазмы II, т. е. скорость ионов можно легко регулировать, изменяя потенциал анода. Кроме того, источник этого типа позволяет варьировать в широком диапазоне и другие параметры потока: концентрацию заряженных частиц (за счет изменения степени ионизации плазмы в камере источника), температуру электронов и потенциал плазмы в потоке (с помощью регулировки накала и места расположения нити нейтрализации).

Значения основных параметров, таких как концентрация заряженных частиц N , скорость направленного движения ионов v_0 , температура электронов T_e в ионосферной аэродинамической трубе и в ионосфере на высотах 100—200 км, представлены в таблице. Из сравнения приведенных величин видно, что ионосферная аэродинамическая труба позволяет воспроизводить интересные условия полета аппарата на указанных высотах и проводить исследование характеристик ионных датчиков ориентации. Диаметр потока в месте расположения объекта исследования (~ 3 м от источника потока) ~ 1 м. При проведении экспериментов датчик устанавливался на платформе координатной системы, которая позволяла перемещать его по длине трубы на расстояние 1,5 м и осуществлять поворот по углам курса и тангажа на $\pm 90^\circ$.

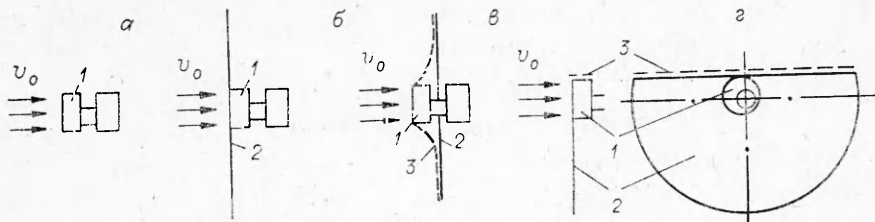
В этой аэродинамической трубе были проведены исследования влияния ряда внешних факторов на выходную угловую характеристику датчика ориентации. К ним относятся: величина потенциала корпуса датчика, давление окружающего газа, способ установки датчика на борту летательного аппарата и т. п.

Экспериментальные исследования влияния потенциала корпуса летательного аппарата (ЛА) на угловые характеристики датчика, выполненные в [2, 3], позволили выяснить, что существенную роль в этом влиянии играет геометрия электрического поля в слое пространственного заряда около датчика. Ход угловых характеристик при изменении потенциала ЛА объясняется на основе представлений о взаимодействии ионов набегающего потока с электрическим полем слоя и учета несимметрии расположения входного отверстия ЧЭ относительно границы слоя.

В проведенных ранее исследованиях [3] слой пространственного заряда формировался только лобовой поверхностью датчика 3 (см. фиг. 1, а). В реальных условиях на движение ионов ионосферы оказывает влияние слой заряда, образующийся непосредственно около ЛА. Поэтому угловые характеристики датчиков, установленных в различных точках лобовой поверхности ЛА, могут отличаться друг от друга.

В данной работе проведено исследование влияния различных способов установки ионного датчика по отношению к корпусу ЛА на зависимость сигналов U_θ и U_ψ датчика от потенциала корпуса аппарата U_k .

Параметр	Ионосфера 100—200 км	Лабораторная установка
N , 1/см ³	10^3 — 10^6	10^3 — $5 \cdot 10^6$
v_0 , км/с	~ 8	4—10
T_e , К	1000—3000	1500—4000

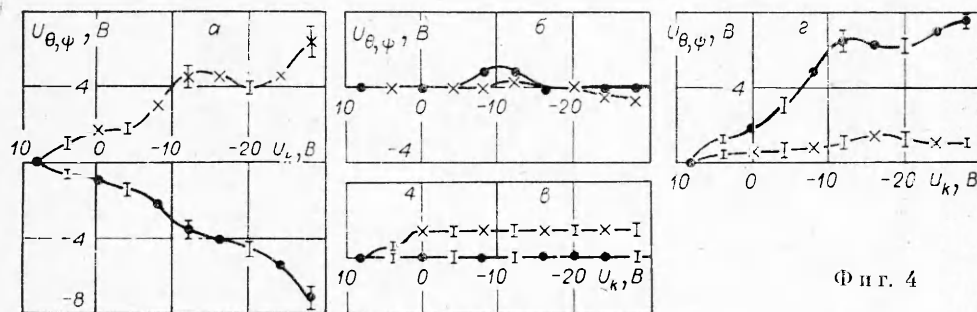


Ф и г. 3

Участок корпуса ЛА моделировался с помощью либо сетчатого экрана диаметром 500 мм, покрытого экранно-вакуумной теплоизоляцией (ЭВТИ), либо с помощью металлического диска-экрана диаметром 600 мм. ЭВТИ представляла собой теплоизоляционный диэлектрический материал, прошитый металлическими нитями, расположенными в виде сетки с размером ячейки 10×10 мм. Диаметр нитей $\sim 0,1$ мм. Экраны монтировались на датчике таким образом, чтобы центр входного отверстия ЧЭ совпадал с центром экранов.

Различные варианты взаимного расположения ионного датчика 1 и экранов 2, покрытых ЭВТИ 3 или без него, показаны в масштабе на фиг. 3. В варианте, изображенном на фиг. 3, а, датчик устанавливался в потоке без экрана, что моделирует, например, расположение датчика на некотором удалении от летательного аппарата. В варианте, показанном на фиг. 3, б, металлический диск-экран размещался заподлицо с лобовой поверхностью датчика, что соответствует условию, когда датчик располагается достаточно далеко от края поверхности ЛА. На фиг. 3, в схематически изображено расположение экранирующих поверхностей, при котором поверхность ЛА в районе расположения датчика и часть ЧЭ, выступающая над поверхностью аппарата, покрыты ЭВТИ. В варианте, показанном на фиг. 3, г, моделируется способ установки ионного датчика на краю лобовой поверхности ЛА, представляющий интерес для некоторых условий использования этих датчиков.

Результаты исследования влияния потенциала корпуса ЛА (U_k) на выходные сигналы датчика (U_θ и U_ψ) для каждого варианта расположения датчика и экранирующих поверхностей (фиг. 3) представлены на фиг. 4. Точки на графиках относятся к сигналам U_θ по каналу тангажа θ , а крестики — к сигналам U_ψ по каналу курса ψ . Вертикальными линиями на кривых показаны среднеквадратичные ошибки измерений, которые составляли в большинстве случаев 15—20% от величины сигнала. Все зависимости, представленные на фиг. 4, получены при нулевых значениях углов отклонения оси ЧЭ датчика по тангажу и курсу. В экспериментах потенциал корпуса датчика U_k регулировался от +8 до -30 В относительно стенок вакуумной камеры (потенциал невозмущенной плазмы в окрестности датчика составлял ~ 10 В). Концентрация заряженных частиц в потоке равна 10^{19} $1/\text{м}^3$, энергия направленного движения ионов на выходе из источника составляла 15 эВ. Во всех случаях экранирующие поверхности и металлические нити ЭВТИ имели тот же потенциал, что и корпус датчика.



Ф и г. 4

При отсутствии на датчике экранирующих поверхностей и ЭВТИ (см. фиг. 3, а) изменение потенциала корпуса приводит к появлению сигналов по обоим каналам (см. фиг. 4, а), что, как отмечалось ранее [2, 3], связано с несимметричным расположением входного отверстия ЧЭ относительно оси симметрии слоя пространственного заряда около датчика, причем величины этих сигналов при больших отрицательных значениях U_k могут превышать величину полезного сигнала.

Установка металлического диска-экрана заподлицо с лобовой поверхностью датчика (см. фиг. 3, б) приводит к тому, что электрическое поле в слое объемного заряда около датчика оказывается близким к полю плоского слоя. Это обуславливает существенное уменьшение искажения траекторий ионов набегающего потока в слое и соответственно снижение влияния потенциала корпуса U_k на величины сигналов U_θ и U_ψ (см. фиг. 4, б).

Для варианта расположения экранирующих поверхностей и датчика, показанного на фиг. 3, в, когда выступающая часть ЧЭ и экран покрыты ЭВТИ, можно отметить отсутствие зависимости сигнала U_θ в канале тангажа от потенциала U_k и слабое влияние этого потенциала на сигнал U_ψ в канале курса (см. фиг. 4, в). Если удалить ЭВТИ, оставив экран на прежнем месте, то наблюдается увеличение сигналов U_θ и U_ψ при изменении U_k . Кроме того, можно отметить, что при компоновке, изображенной на фиг. 3, в, влияние потенциала корпуса на сигналы датчика оказывается более заметным, чем при компоновке, показанной на фиг. 3, б. Эти результаты показывают, что выдвигание части датчика над поверхностью аппарата приводит к формированию в слое около датчика неоднородного электрического поля. Однако наличие ЭВТИ на датчике и экране способствует выравниванию этого поля.

На фиг. 4, г представлены результаты исследования варианта расположения ионного датчика, показанного на фиг. 3, г. Видно, что в этом случае влияние потенциала U_k на сигнал в канале тангажа оказывается более существенным, чем в канале курса. Такая зависимость удовлетворительно согласуется с представлениями о влиянии взаимного расположения слоя объемного заряда и входного отверстия ЧЭ на зависимость сигналов U_θ и U_ψ от потенциала U_k . Действительно, в рассматриваемом случае слой объемного заряда имеет большую кривизну со стороны среза экрана. Это приводит к более существенному искривлению траекторий ионов потока в направлении коллекторов III и IV (см. фиг. 1, а), что воспринимается датчиком как отклонение оси ЧЭ в положительном направлении по тангажу. Соответственно и сигнал U_θ (см. фиг. 4, г) имеет положительный знак. В то же время изменение потенциала корпуса U_k оказывает заметно меньшее влияние на сигнал U_ψ в канале курса, так как относительно осей $\pm\psi$ распределение поля в слое остается близким к симметричному.

Таким образом, рассмотренные результаты показывают возможность проведения в ионосферной аэродинамической трубе сопоставления различных способов установки ионного датчика ориентации на ЛА и выбор наиболее оптимальной компоновки с точки зрения минимума влияния потенциала корпуса ЛА на выходные сигналы датчика. Кроме того, эти результаты подтверждают сделанные ранее предположения [3] о характере влияния геометрии электрического поля слоя объемного заряда около датчика на его выходные сигналы.

Эти исследования показывают также эффективность использования ионосферных аэродинамических труб для изучения влияния различных факторов полета на характеристики измерительной аппаратуры, применяемой в условиях орбитальных полетов.

Поступила 15 VI 1982

ЛИТЕРАТУРА

1. Раушенбах Б. В., Токарь Е. Н. Управление ориентацией космических аппаратов. М.: Наука, 1974.
2. Архипов С. И., Носачев Л. В. и др. Исследование характеристик ионных датчиков ориентации летательного аппарата в потоке ионизированного газа. — Учен. зап. ЦАГИ, 1977, т. 8, № 5.
3. Енютин Г. В., Скворцов В. В., Успенский А. А. Исследование влияния потенциала корпуса летательного аппарата на характеристики ионных датчиков ориентации. — Учен. зап. ЦАГИ, 1981, т. 12, № 1.
4. Скворцов В. В., Носачев Л. В. Исследование структуры следа за сферическими молекулами в потоке разреженной плазмы. — Космические исследования, 1968, т. 6, вып. 2.
5. Никитин В. Е., Носачев Л. В., Скворцов В. В. Исследование характеристик камеры ионизации и свойств потока газоразрядного ионного источника. — ПМТФ, 1977, № 1.

УДК 933.95; 533.9

ИССЛЕДОВАНИЕ НАЧАЛЬНОЙ НЕРАВНОВЕСНОСТИ СВЕРХЗВУКОВОГО ПОТОКА ДУГОВОЙ ПЛАЗМЫ НИЗКОЙ ПЛОТНОСТИ

Г. М. Жинжиков, В. В. Сахин
(Ленинград)

В последнее время большое внимание уделяется исследованиям неравновесных процессов в сверхзвуковых потоках переохлажденной плазмы. Особенно интенсивно изучаются условия неравновесного заселения возбужденных состояний атомов и ионов плазмообразующего тела. В качестве рабочих тел в экспериментальных исследованиях используют чаще всего газы, при теоретических расчетах — пары легкоионизирующихся металлов, признанных перспективными рабочими телами плазмодинамических лазеров, прежде всего пары лития. Например, в сверхзвуковых струях плазмы наблюдалась инверсия заселенностей уровней водорода [1] и гелия [2], получена генерация излучения в сверхзвуковых струях плазмы аргона [3] и водорода [4]. Во всех экспериментах поток плазмы истекал из электродугового источника в разреженную среду при стационарном [1, 2] или квазистационарном [3, 4] режиме.

Экспериментальные исследования параметров плазмы в разреженных сверхзвуковых струях, генерируемых электродуговыми источниками, также обнаруживают сильную термическую и ионизационную неравновесность плазмы как в потоке, начиная со среза сопла [5], так и в дуговой камере источника плазмы [6].

Существенная начальная неравновесность плазмы, полученной дуговым разрядом (дуговой плазмы), осложняет анализ закономерностей изменения ее параметров в процессе последующего расширения. К настоящему времени, несмотря на интенсивные исследования (см., например, [7]), методы оценки параметров дуговой плазмы остаются весьма сложными.

В данной работе излагается инженерный метод оценки параметров термической плазмы, образованной дуговым разрядом постоянного тока при давлении в камере источника не выше 10^5 Па и температуре $T_0 = (2-20) \cdot 10^3$ К. Результаты оценки сравниваются с результатами экспериментальных исследований параметров дуговой плазмы.

Предлагаемый метод основан на следующих допущениях:

— плазма предполагается идеальной, двухтемпературной, состоящей из электронов, ионов и атомов с максвелловским распределением по скоростям и соответствующими температурами для электронов T_e и тяжелых частиц (атомов и ионов) T_0 ;

— в области дугового разряда параметры плазмы однородны;

— ионизационное равновесие в плазме соответствует температуре электронов T_e ;

— разрыв между температурами T_e и T_0 обусловлен только наличием электрического поля.

В такой постановке состояние плазмы, находящейся в электрическом поле дуги, может быть описано системой уравнений для термодинамически равновесной плазмы с привлечением соотношения, задающего неизотермичность плазмы в зависимости от напряженности электрического поля E . В качестве такого соотношения использовалось уравнение Фи в Кельнбурга [8], отражающее баланс энергии, приобретаемой элект-