

Исследование характеристик генераторов меток ионно-меточных систем измерения параметров полета

Ф.А. ГАНЕЕВ,

канд. техн. наук,

В.М. СОЛДАТКИН,

д-р техн. наук,

И.Р. УРАЗБАХТИН,

инженер

(КНИТУ-КАИ, Казань)

haibulova.piis@kstu-kai.ru

Рассматриваются особенности ионно-меточных систем измерения высотно-скоростных параметров полета. Приводятся варианты построения генераторов ионных меток, их модели и характеристики, результаты экспериментальных исследований базового варианта.

Высотно-скоростные параметры, измерение, ионно-меточные системы, генератор меток, варианты, исследование, модели, характеристики

Расширение круга решаемых задач, рабочих диапазонов эксплуатации и области применения авиационной техники обуславливает необходимость пополнения арсенала средств измерения параметров полета.

Для выполнения полета в пределах атмосферы необходима информация о высотно-скоростных параметрах, определяющих динамику движения летательного аппарата относительно окружающей воздушной среды.

Важное место среди средств измерения высотно-скоростных параметров занимают ионно-меточные измерительные системы, при работе которых в набегающем на летательный аппарат воздушном потоке с помощью генератора меток создается локальная ионизированная область (метка) с ярко выраженным электростатическим зарядом и регистрируется ее движение совместно с набегающим потоком с помощью распределенных в плоскости измерения металлических электродов. Обработкой регистрируемых сигналов определяются величина (модуль) истинной воздушной скорости, аэродинамический угол в плоскости измерения (угол атаки или скольжения), регистрируются другие параметры полета [1–4].

Отсутствие выступающих в набегающем воздушном потоке подвижных и механических элементов, чисто электронные каналы регистрации, преобразования и обработки информативных сигналов, кинематический метод измерения, а следовательно, независимость результатов измерения от температуры, давления и других параметров окружающей воздушной среды выгодно отличают ионно-меточные системы измерения параметров полета от традиционных приемников воздушных давлений, флюгерных и щелевых датчиков аэродинамических углов, комбинированных датчиков аэродинамических параметров и систем воздушных сигналов [5].

Как показывает опыт разработки ионно-меточных систем измерения параметров полета, их эксплуатационные и метрологические характеристики в значительной мере определяются типом используемого генератора ионных меток, что определило задачу исследования вариантов их построения.

Применительно к задаче определения параметров полета в условиях реальной эксплуатации авиационной техники в ионно-меточных измерительных системах целесообразно использовать униполярные ионные метки (ИМ), представляющие собой локальную область воздушного потока с повышенной концентрацией ионов одной полярности, образованную определенным энергетическим воздействием на молекулы воздушной среды. Такая ИМ может быть сформирована в малом объеме потока, а ее газодинамические свойства практически не отличаются от свойств воздушной среды, что обеспечивает полное соответствие параметров движения метки с характеристиками течения контролируемого воздушного потока.

Как показывает практика, величина заряда ИМ, достаточная для ее надежной регистрации, должна сохраняться в течение 50–80 мс после ее генерации, что позволяет измерять параметры воздушного потока уже при скорости потока около 0,5 м/с.

Важным преимуществом униполярных ИМ является возможность их регистрации бесконтактным способом, а именно с помощью металлических электродов, на которых за счет эффекта электростатической индукции при пролете над ними заряженной ИМ наводится импульсный электрический сигнал. При этом электроды могут быть изолированы от потока диэлектрическим материалом, что обеспечивает высокую надежность работы ионно-меточных измерительных каналов при воздействии влаги, пыли и т.п.

В общем случае ИМ может быть создана в воздушном потоке путем воздействия на локальную область воздушной среды электромагнитным излучением, быстрыми частицами, испускаемыми радиоак-

тивными изотопами, а также с помощью коронного или искрового разряда. В зависимости от способов создания ИМ обладают теми или иными свойствами, которые определяют области их применения, в том числе на летательных аппаратах.

Разработке способов и технических средств формирования ИМ с помощью модуляции излучения радиоактивных изотопов посвящена работа [6]. Сравнительно большая область локальной ионизации, наличие механических элементов модулятора ионизирующих частиц, а также низкая ионизирующая способность и экологическая опасность радиоактивных изотопов ограничивают область их применения в ионно-меточных измерительных каналах. В работе [7] для формирования ИМ при измерении параметров разряженного потока газа обосновывается возможность использования электронных пучков, создаваемых с помощью электронных пушек, применение которых в воздушном потоке невозможно из-за повышенной плотности воздушной среды. Особенности создания ИМ за счет оптического разряда, осуществляемого в потоке газа с помощью мощного лазерного излучения, и результаты использования такого метода при измерении скорости воздушного потока рассмотрены в работе [8]. Существенным преимуществом этого способа является возможность локальной ионизации газа на большом расстоянии от генератора практически в любой точке контролируемого потока, однако сложность аппаратуры и большое энергопотребление ограничивают широкое использование данного метода при бортовых измерениях.

Характерным свойством ИМ, созданных указанными способами, является также и то, что в ионизированной локальной области воздушного потока число положительных ионов примерно равно числу отрицательных. В связи с этим созданная ИМ представляет собой электрически нейтральную локальную область, что не позволяет осуществлять ее регистрацию бесконтактным способом.

Для создания униполярных ИМ, обладающих электрическим зарядом, чаще всего используют кратковременный коронный или искровой разряд, осуществляемый в контролируемом воздушном потоке с помощью соответствующих коронирующих или искровых разрядников. Разрядник и формирователь высоковольтных импульсов образуют генератор униполярных ИМ, который является одним из основных элементов ионно-меточных измерительных каналов.

Коронный разряд в ряде случаев является предпочтительным способом создания униполярных ИМ. Коронирующий электрод имеет, как правило, небольшие габариты и практически не искажает характер течения контролируемого воздушного потока. Кроме того, при коронном разряде не возникает термодинамических возмущений потока. В зависимости от полярности импульсного напряжения, подаваемого на коронирующий электрод, могут создаваться как положительно, так и отрицательно заряженные ИМ.

Коронный разряд возникает в достаточно плотной газообразной среде в той зоне электродной системы, где электрическое поле наиболее неоднородное. Как правило, эта зона находится вблизи острой кромки коронирующего электрода, чаще всего имеющего форму иглы. При подаче на коронирующий электрод достаточно большого потенциала напряженность поля на остром конце электрода достигает критического значения E_k , достаточного для ионизации газа электронным ударом в области, прилегающей к электроду. Ионы, возникающие во внутренней зоне разряда вследствие кинетических процессов, выходят из нее и образуют внешнюю область коронного разряда с униполярным ионным пространственным зарядом, поле которого ограничивает интенсивность разряда и оказывает стабилизирующее воздействие на разряд.

Величина критического значения E_k напряженности поля коронирующего электрода зависит от давления, температуры, влажности, скорости и других параметров и физических свойств газа [9]. В настоящее время разработаны и используются приближенные методы расчета параметров коронного разряда для сравнительно простых случаев, которые могут быть использованы в качестве отправной точки при создании конструкций генераторов ИМ. Уточнение свойств данных генераторов и проверка соответствия их характеристик необходимым требованиям осуществляется на основе экспериментальных исследований коронного разряда.

Для определения критического значения E_k поля зажигания короны в воздухе часто пользуются эмпирической формулой Пика [10]

$$E_k = 31n_p(1 + 0,308/n_p r), \quad (1)$$

где $n_p = \rho/\rho_0$ – отношение плотности воздуха ρ в рабочих условиях к нормальной плотности ρ_0 на уровне земли; r – радиус закругления коронирующего электрода.

Связь порогового значения потенциала U_k , необходимого для зажигания короны, со значением E_k определяется электростатическим законом распределения поля в межэлектродном промежутке и зависит от конструкции электродной системы. Для наиболее простых конфигураций электродов имеются точные решения уравнений электростатики, в соответствии с которыми получены соотношения, связывающие конструктивные параметры, напряженность поля и потенциал коронирующего электрода. Например, для игольчатого электрода с радиусом закругления r и перпендикулярной ему плоскостью, расположенной на расстоянии d , максимальная напряженность поля на конце иглы определяется соотношением [11]

$$E_{\max} = 2U_k / r \ln(2d/r), \quad (2)$$

по которому с учетом формулы Пика можно оценить пороговое значение потенциала зажигания короны U_k , кВ:

$$U_k = 15,5 n_p r \ln(2d/r) (1 + 0,308/n_p r). \quad (3)$$

Для реальных конструкций генераторов ИМ величина порогового потенциала U_k находится в пределах 4...6 кВ. Величину тока i_k , мкА, коронного заряда для игольчатого электрода можно оценить по приближенной формуле [8]

$$i_k = (52/d^2) U (U - U_k), \quad (4)$$

где U – потенциал коронирующего электрода, превышающий пороговое значение.

Как правило, ток коронного разряда в данном случае не превышает значений 1–2 мкА.

Порядок величины объемного заряда q в зоне коронного разряда можно оценить по формуле

$$q = B(U - U_k / l^2), \quad (5)$$

где $B = 1$ – безразмерный геометрический параметр; l – характерный геометрический размер зоны коронного разряда. Для рассматриваемого игольчатого электрода при $l = 0,25$, $U - U_k = 1$ кВ величина объемного заряда в зоне коронного разряда определяется величиной $q = 5,2 \cdot 10^{-9}$ Кл/см³.

Время запаздывания между моментом подачи напряжения на коронирующий электрод и началом резкого роста тока короны, т.е. образованием ионизированной области, складывается из статического времени ожидания затравочного электрона в зоне острия электрода и времени размножения лавин или образования стримеров [10]. Многочисленные эксперименты показывают [11], что в нормальных условиях время запаздывания зажигания короны составляет порядка $10^{-8} - 10^{-6}$ с, что существенно меньше времени пролета ИМ расстояния от генератора ИМ до приемных электродов даже при весьма больших скоростях контролируемого воздушного потока.

При коронном разряде имеет место сильное электрическое взаимодействие ионов с коронирующим электродом, что обуславливает слабую чувствительность параметров разряда к движению газа с умеренными скоростями. Однако при скоростях контролируемого потока порядка сотен метров в секунду движение газа влияет на процессы разряда, что приводит к увеличению тока разряда и потенциала зажигания короны [9]. Кроме того, как видно из выражения (3), величина потенциала зажигания U_k уменьшается при уменьшении давления окружающей среды. При большом диапазоне изменения давления возникает необходимость адаптивного изменения параметров высоковольтного импульса, подводимого к коронирующему электроду. В противном случае устойчивость коронного разряда может быть нарушена, т.е. разряд может перейти сразу в искровой или корона не зажжется. Приведенные оценки позволяют сделать вывод о том, что коронный разряд целесообразно использовать, если физические характеристики и газодинамические параметры контролируемого воздушного потока изменяются в сравнительно небольших пределах.

Искровой разряд, в отличие от коронного, характеризуется меньшей чувствительностью к скорости контролируемого потока и плотности воздушной среды, но сопровождается сочетанием быстрых нестационарных электроионизационных, термодинамических, акустических и других процессов, что обуславливает трудность изучения этого явления.

При искровом разряде ионизация локальной области воздушного потока, заключенной в межэлектродном промежутке, образованном двумя электродами, происходит в результате искрового пробоя, воз-

никающего при подаче на электроды напряжения, превышающего напряжение пробоя $U_{пр}$. Величина этого напряжения в основном зависит от давления воздуха P и расстояния между электродами d и определяется эмпирической формулой [7]

$$U_{пр} = \frac{365(Pd)}{1,18 \ln(Pd)}. \quad (6)$$

Вычисленное по формуле (6) напряжение пробоя $U_{пр}$ хорошо согласуется с экспериментальными зависимостями, полученными Пашеном.

Из формулы (6) видно, что при фиксированном d необходимое для пробоя напряжение $U_{пр}$ с уменьшением давления окружающей среды также уменьшается, что увеличивает вероятность возникновения искрового разряда. Таким образом, выбор величины $U_{пр}$, формируемого источником высоковольтных импульсов, осуществляется с учетом максимального давления P в эксплуатационных условиях и для ионно-меточных систем измерения параметров полета составляет порядка 4–6 кВ.

Время запаздывания возникновения искрового разряда при нормальных условиях составляет порядка $10^{-8} - 10^{-6}$ с и с увеличением перенапряжения на электродах разрядника уменьшается [10].

Ионизированная область, сформированная искровым разрядом, состоит из положительных и отрицательных ионов. При этом суммарный заряд этой области невелик, что затрудняет регистрацию такой метки. В работе [12] предложен генератор ИМ, в котором увеличение заряда ИМ достигается воздействием на нее дополнительным электрическим полем. При этом реализуется индукционный метод дополнительной зарядки ионизированной области. Величину заряда сформированной метки в этом случае можно оценить по формуле [13]

$$q_m = \gamma \pi \varepsilon E_d d, \quad (7)$$

где γ – коэффициент, зависящий от формы ионизированной области; ε – диэлектрическая проницаемость среды; d – характерный размер ионизированной области, например, расстояние между электродами разрядника; E_d – напряженность дополнительного поля, воздействующая на ионизированную область.

С целью определения влияния режимных и конструктивных параметров генераторов ИМ на величину заряда метки проведен цикл экспериментальных исследований.

Зависимость заряда q_m ИМ от напряженности E_d дополнительного поля представлена на рис. 1. Как видим, в диапазоне изменения E_d 0...120 кВ/м эта зависимость имеет линейный характер и согласуется с формулой (3). При дальнейшем увеличении E_d наблюдается снижение темпа роста q_m , что, очевидно, связано с ограниченной концентрацией ионов в метке.

В ходе экспериментов установлено, что при увеличении межэлектродного промежутка d разрядника заряд q_m ИМ возрастает (рис. 2). При $d < 0,7$ мм зависимость $q_m(d)$ описывается соотношением (5), при $d > 0,8$ мм величина заряда изменяется незначительно.

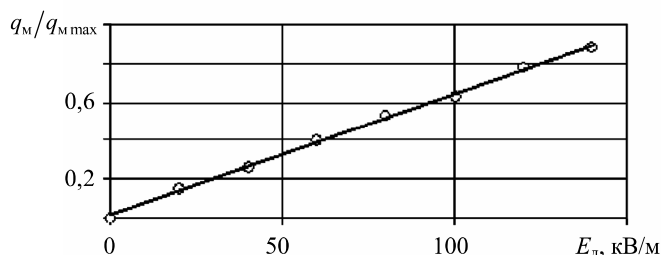


Рис. 1

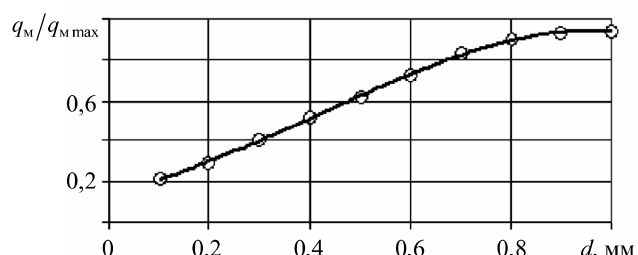


Рис. 2

Важной характеристикой униполярной ИМ является пространственное распределение зарядов. Процессы диффузии, рекомбинации ионов, а также кулоновское взаимодействие приводят к изменению величины суммарного заряда ИМ и ее геометрических размеров во времени.

Результаты исследований показывают, что зависимость $q_m(t)$ изменения заряда ИМ от времени может быть аппроксимирована выражением

$$q_m(t) = q_0 [1 - \exp(-\beta/t)], \quad (8)$$

где $\beta = 5 \div 6$ мс, и иллюстрируется рис. 3.

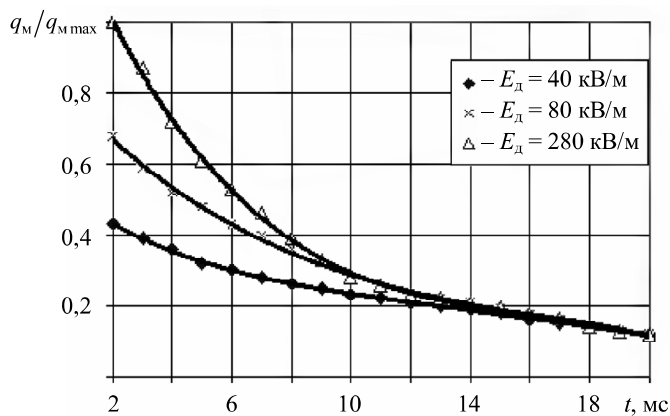


Рис. 3

Результаты исследований пространственных характеристик униполярных ИМ в воздушном потоке в диапазоне скоростей 0,5...30 м/с приведены в работе [14]. Измерение концентрации зарядов униполярной ИМ осуществлялось в трехмерном пространстве с помощью зонда Фарадея. Результаты измерений пространственного распределения плотности зарядов ИМ в различных временных сечениях представлены в виде графиков на рис. 4.

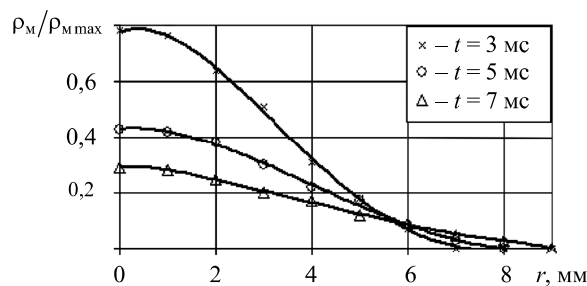


Рис. 4

Исследования показали, что распределение зарядов в ИМ, переносимой воздушным потоком, имеет форму сферы. Плотность распределения зарядов соответствует функции Гаусса (см. рис. 4). Изменение (увеличение) объема метки во времени характеризуется зависимостью среднего радиуса r , при котором плотность заряда метки ρ_M равна половине максимальной плотности ρ_{Mmax} .

Из проведенных экспериментов также следует, что квадрат среднего радиуса r ИМ имеет почти линейную зависимость от времени t ее жизни.

Результаты исследований были положены в основу разработок генераторов ИМ (ГИМ) для различных модификаций ионно-меточных систем измерения параметров полета. Созданы простые, экономичные и надежные конструкции ГИМ как на основе коронного, так и искрового разряда, обеспечивающие генерацию ИМ с зарядом порядка 10^{-10} Кл и частотой генерации от единиц герц до нескольких килогерц. Основные характеристики некоторых модификаций ГИМ приведены в таблице [1].

Тип ионно-меточной измерительной системы (объект применения)	Датчик горизонтального вектора скорости ДГВС-137 (вертолет)	Измеритель воздушной скорости – лабораторный ИВС-Л	Датчик воздушной скорости ДВС-1 (беспилотный ЛА)
Напряжение питания	27 В	50 В	6 В
Потребляемый ток	20 мА	3–200 мА	5 мА
Частота генерации	150 Гц	5–1000 Гц	30 Гц
Габаритные размеры	Диаметр 40×40 мм	20×30×50 мм	20×20×45 мм

Таким образом, полученные результаты определяют особенности построения и характеристики вариантов ГИМ, модели и технические характеристики базовых вариантов, используемых в ионно-меточных системах измерения параметров полета различных классов летательных аппаратов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Солдаткин В.М. Методы и средства измерения аэродинамических углов летательных аппаратов. Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2001. 448 с.

2. Солдаткин В.М. Методы и средства построения бортовых информационно-управляющих систем обеспечения безопасности полета. Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2004. 350 с.
3. Ганеев Ф.А., Солдаткин В.М. Ионно-меточный датчик аэродинамического угла и воздушной скорости с логометрическими информативными сигналами и интерполяционной схемой обработки // Изв. вузов. Авиационная техника. 2010. № 3. С. 46–50.
4. Ганеев Ф.А., Ганеев Т.Ф., Уразбахтин И.Р. Синтез электродной системы и моделирование ионно-меточного датчика аэродинамического угла и воздушной скорости // Изв. вузов. Авиационная техника. 2012. № 4. С. 52–55.
5. Макаров Н.Н. Системы обеспечения безопасности функционирования бортового эргатического комплекса: теория, проектирование, применение. М.: Машиностроение – Полет, 2009. 760 с.
6. Агейкин Д.И., Мельтцер Л.В., Шумиловский Н.Н. Модуляция радиоактивного излучения для устройств автоматического контроля // Автоматика и телемеханика. 1958. Т. 18. Вып. 7. С. 686–688.
7. Ершов В.И. и др. Измерение скорости разреженного газового потока с помощью ионной метки // Механика жидкости и газа. 1974. № 6. С. 121–126.
8. Райзер Ю.П. Пробой и нагревание газов под действием лазерного луча // Успехи физических наук. 1965. Т. 87. С. 29–64.
9. Ватажин А.Б. и др. Электрогазодинамические течения. М.: Наука, 1983. 344 с.
10. Левитов В.Н. Корона переменного тока. М.: Энергия, 1975. 280 с.
11. Райзер Ю.П. Физика газового разряда: Учебное руководство. М.: Наука, 1987. 592 с.
12. А.с. 814051 РФ, МКИ G01p 5/18. Устройство для измерения скорости потока газа или жидкости / С.К. Бальцер, Ф.А. Ганеев, А.С. Иванчук, Г.И. Ключев, С.А. Никольский, А.Б. Попов, В.М. Солдаткин, В.А. Ференц (РФ). № 2808259; заявл. 7.08.1979; опубл. 14.10.80. Бюл. № 25.
13. Верецагин И.П., Левитов В.И., Мирзабекян Г.З. Основы электрогазодинамики дисперсных систем. М.: Энергия, 1974. 480 с.
14. Barriol R., Hannyer G., Rousseau C. A new approach for ionic air flow sensors: Transit time: SAE Techn. Paper № 840138. Ser. 1984. P. 29–39.

Поступила в редакцию 13.05.14

Study of Tracer Generator Performance in Ionic Tracer Systems for Flight Parameter Measurement

F.A. GANEEV, V.M. SOLDATKIN, AND I.R. URAZBAKHTIN

The features of ionic tracer systems for flight altitude and speed parameter measurement are considered. The variants of ionic tracer generators, their models and characteristics, results of experimental study of the base type are presented.

Altitude and speed parameters, measurement, ionic tracer systems, tracer generator, variants, research, models, features