

УДК 533

ЗОНДОВЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ НА БОРТУ ГИПЕРЗВУКОВОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

© 2020 г. В. А. Котельников^{1,2}, М. В. Котельников^{1,2, *}, Д. В. Кассин^{1,2, **}

¹Московский авиационный институт, Москва, Россия

²Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия

*E-mail: mvk_home@mail.ru

**E-mail: dmitry1550@gmail.com

Поступила в редакцию 17.04.2019 г.

После доработки 05.10.2019 г.

Принята к публикации 22.10.2019 г.

Обсуждаются особенности зондовых измерений на гиперзвуковых летательных аппаратах (ГЛА), конструкция зондового блока и его расположения на ГЛА, методика обработки полученных вольт-амперных характеристик. Предлагаются оригинальные методики обработки, приводятся некоторые результаты зондовых измерений, охвативших как параметры плазмы в продуктах сгорания жидкостного ракетного двигателя, так и параметры плазмы, возникающей при сверхзвуковых скоростях вблизи стенки ГЛА.

DOI: 10.31857/S0040364420020118

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в связи с работами по созданию гиперзвуковых летательных аппаратов (ГЛА), развивающих скорости до 10 Махов и более, представляют интерес зондовые измерения параметров низкотемпературной плотной плазмы в продуктах сгорания жидкостных ракетных двигателей (ЖРД), а также пристеночной плазмы, возникающей вследствие ионизации воздуха в головной ударной волне. Для этих целей подходят плоские пристеночные и выносные цилиндрические зонды (рис. 1). При проведении экспериментов предпочтение отдавалось плоским пристеночным зондам, поскольку они не нарушают аэродинамику ГЛА и меньше подвергаются нагреву в результате контакта с плазмой. Обзор работ по исследованию параметров плазмы в продуктах сгорания ЖРД есть в [1], где, в частности, отмечается, что практически все имеющиеся экспериментальные результаты получены на модельных стендовых установках.

Теоретические основы зондовой диагностики в потоках низкотемпературной слабоионизованной плотной плазмы разрабатывались как за рубежом (см. обзор в [2]), так и в отечественной литературе [3–12]. В [2] Чаном предложена формула для вычисления концентрации ионов вблизи боковой поверхности ГЛА по ионному току насыщения плоского пристеночного зонда при условии, что толщина слоя объемного заряда зонда мала по сравнению с толщиной пограничного слоя. В [10] получен набор вольт-амперных ха-

рактеристик (ВАХ) плоского пристеночного зонда ленточного типа, расположенного на боковой поверхности ГЛА. В [11, 12] представлено несколько упрощенных методик обработки ВАХ плоских пристеночных зондов.

При проведении зондовых измерений на ГЛА основное внимание уделялось надежности и достоверности эксперимента, а также минимизации габаритных, весовых, мощностных и других характеристик зондового блока, включающего зонды, электронную схему, схему передачи сигнала через телеметрию и т.д.

Обсуждаемый эксперимент методически удобно разбить на две части.

1) В момент запуска жидкостного ракетного двигателя первой ступени пусковая шахта заполняется продуктами сгорания топлива, представляющего собой слабоионизованную плотную плазму, которая попадает на активную поверхность зондов. Измерение, проводимое в продуктах сгорания ЖРД, позволяет получить информацию о концентрации в них ионов и электронов. Аналогичная ситуация возникает в момент включения двигателей второй ступени. Отражаясь от отделенной первой ступени, продукты сгорания попадают на зондовые датчики, что дополнительно позволяет оценить концентрацию в них заряженных частиц.

2) По мере разгона ракеты наступает момент, когда скорость ее достигает скорости звука. Возникающая в головной части ракеты ударная волна вызывает ионизацию воздуха и образование



(a)



(б)

Рис. 1. Внешний вид блоков с плоскими (а) и цилиндрическими (б) зондами.

слабоионизованной плотной плазмы, которая обволакивает ракету и попадает на зонды. Концентрация заряженных частиц в пристеночной плазме зависит от скорости ГЛА и может создавать препятствие для прохождения сигналов радиосвязи. Температура пристеночной плазмы может достигать нескольких тысяч градусов по шкале Кельвина, что накладывает дополнительные условия на теплозащиту корпуса ракеты. Указанные эффекты существенно усиливаются,

когда ракета достигает скоростей 10 Махов и более.

Приведенные выше две части эксперимента отличаются химическим составом плазмы, режимом работы зондов, значениями концентраций и температур заряженных и нейтральных частиц.

КОНСТРУКЦИЯ ЗОНДОВОГО БЛОКА И ЕГО РАСПОЛОЖЕНИЕ НА ГЛА

Зонды плоские пристеночные или выносные цилиндрические устанавливались на боковой поверхности двухступенчатой ракеты, которая стартовала из пусковой шахты и достигала высоты h , превышающей 30 км над поверхностью Земли. Зонды группировались в блоки, состоящие из четырех зондов. Внешний вид блоков приведен на рис. 1. Такое количество зондов в одном блоке позволяло многократно повысить надежность эксперимента. На боковой поверхности ракеты одновременно устанавливалось несколько таких блоков, что позволяло расширить информацию о радиофизических параметрах плазменного образования, возникающего вблизи поверхности ГЛА при скоростях, превышающих скорость звука.

Плоские пристеночные зонды представляют собой торцы графитовых стержней, покрытые снаружи нитридом циркония. Диаметр зондов — 5 мм, диаметр всего зондового блока — 36 мм. Расстояние между зондами составляет 15 мм, что достаточно для исключения их взаимного влияния.

Цилиндрические зонды изготавливались из молибденовой проволоки диаметром 0.8 мм и длиной 10 мм. Направление цилиндрических зондов совпадало с осью симметрии ракеты.

Электронная зондовая схема формирует пилообразный потенциал с амплитудой ~ 5 В и периодом 1 с, который подается между двумя соседними зондами. Питание схемы осуществляется от бортового источника питания. В схеме предусмотрена гальваническая развязка с бортовым источником питания и телеметрией, а также формирователь сигнала, пропорционального зондovому току, который должен быть согласован с телеметрией.

Зондовое устройство, включающее собственно зонды и электронную измерительную схему, прошло все необходимые испытания на перегрузки, вибрации, перепады температур и давлений.

МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ ВАХ ПЛОСКИХ ПРИСТЕНОЧНЫХ ЗОНДОВ В РЕЖИМЕ СПЛОШНОЙ СРЕДЫ

Измерения в продуктах сгорания ЖРД. Оценочный расчет можно провести по формуле Котельникова В.А., полученной для случая тонкого столкновительного слоя объемного заряда [13]:

$$n_i = [kT_i j_i^2 / (D_i^2 e^4)]^{1/3}, \quad (1)$$

где T_i, j_i, D_i – температура, плотность ионного тока, коэффициент диффузии для ионов; остальные обозначения стандартные. В обзоре [1] показано, что в камере сгорания ЖРД в зависимости от типа топлива и условий горения температура продуктов сгорания достигает $(3-6) \times 10^3$ К. На выходе из сопла она снижается в несколько раз и составляет $(1-2) \times 10^3$ К. Коэффициент диффузии ионов рассчитывается по стандартной формуле [14].

Если условия вывода формулы (1) не выполняются, для расчета концентрации заряженных частиц приходится использовать циклический процесс, основанный на сравнении измеренной плотности ионного тока j_p с теоретически полученными ВАХ плоского пристеночного зонда. Приведем этот циклический метод расчета.

1. Считаются известными $\varphi_p, j_p, r_p, D_i, T_i$, где r_p – характерный размер зонда, φ_p – достаточно большой отрицательный потенциал зонда, при котором измерен ионный ток плотностью j_p .

2. Выбирается начальное значение n_{i1} (например, по формуле (1)) и определяется радиус Дебая $r_{d1} = (\epsilon_0 k T_i / n_{i1} e^2)^{1/2}$, где $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12}$ Ф/м. Далее вычисляем безразмерный радиус зонда $r_{01} = r_p / r_{d1}$.

3. По заданным значениям параметров r_{01} и $\epsilon = T_i / T_e = 1$ выбирается теоретическая ВАХ [10–12].

4. При выбранном значении $\varphi_0 = \varphi_p e / k T_i$ по теоретической ВАХ находится безразмерная плотность ионного тока j_0 . По формуле $j_0 = j_p / M_j$, где $M_j = e n_{i2} D_i / r_{D1}$ – масштаб плотности тока, рассчитывается n_{i2} .

5. Если $|n_{i2} - n_{i1}| < \delta$, где δ – малое первоначально заданное число, то $n_{i2} = n_{i\infty}$, $n_{i\infty}$ – концентрация ионов в невозмущенной зондом плазме, и расчет заканчивается. Если данное неравенство не выполняется, то переходим на второй пункт метода и расчет повторяется, пока оно не будет выполнено.

Измерения в пристеночной плазме, возникающей вследствие ионизации воздуха в головной ударной волне. Обработку ВАХ в данном случае можно проводить по формуле Чана [2]

$$j_{i0} = \frac{0.47}{\sqrt{2}} \left(\frac{2}{Sc_i} \right)^{2/3} = \frac{j_{ip}}{e n_{i\infty} u_{i\infty}} \left(\frac{Re_x}{L} \right)^{1/2}, \quad (2)$$

которая справедлива при условии, когда толщина пограничного слоя $\delta > 10^2 r_D$. В (2) Sc_i – ионное число Шмидта, Re_x – число Рейнольдса для точки расположения зонда x , $u_{i\infty}$ и $n_{i\infty}$ – скорость

и концентрация плазмы на внешней границе пограничного слоя. Коэффициент L учитывает неоднородность температуры в пограничном слое и в данных экспериментах близок к единице. Ионное число Шмидта Sc_i в условиях эксперимента также близко к единице. Скорость $u_{i\infty}$ равна скорости движения ГЛА. Эта скорость меняется со временем и в момент времени $t = 30$ с равна скорости звука. Число Рейнольдса рассчитывается по стандартной формуле [15] и меняется со временем полета в соответствии с изменением скорости ГЛА и коэффициента динамической вязкости среды. Достоверность формулы Чана (2) неоднократно подвергалась экспериментальной проверке сравнением зондовых измерений с оптическими. Результаты оказались удовлетворительными [9]. Если условие $\delta > 10^2 r_D$ не выполняется, то используется циклический процесс обработки, аналогичный приведенному выше [10–12].

НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ЗОНДОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

На рис. 2 приведены плотность ионного тока и концентрация заряженных частиц в зависимости от времени полета ГЛА для одного из экспериментов с двойными зондами. Первый всплеск зондового тока произошел на четвертой секунде в момент запуска ЖРД первой ступени. Концентрация заряженных частиц в продуктах сгорания составила 10^8-10^9 см⁻³. Второй всплеск наблюдался на 25–27 секунде полета, когда включились двигатели второй ступени. Концентрация, как и в предыдущем случае, составляла 10^8-10^9 см⁻³.

Начиная с тридцатой секунды, когда скорость ГЛА достигла звуковой, появилась головная удар-

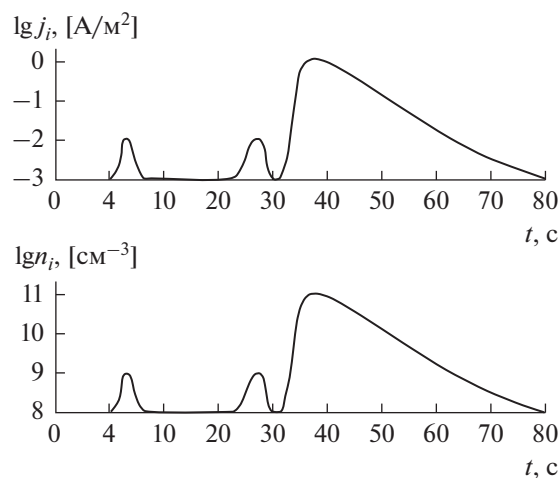


Рис. 2. Плотность ионного тока и концентрация ионов в зависимости от времени полета ГЛА.

ная волна. Начался рост пристеночной концентрации, максимум которой составил $5 \times 10^{10} \text{ см}^{-3}$ на тридцать седьмой секунде. После этого начинается медленный спад концентрации, что связано с отключением двигательной системы и постепенным торможением ГЛА в атмосфере Земли. На восьмидесятой секунде полета вследствие естественного торможения ГЛА скорость стала дозвуковой и пристеночная концентрация стала ниже порога чувствительности зондовой схемы, который составлял примерно 10^{-3} А/м^2 .

Приведенные значения концентраций заряженных частиц в данном эксперименте подтверждены рядом других аналогичных экспериментов с плоскими и цилиндрическими зондами на поверхности ГЛА.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Методики обработки зондовых экспериментов, предложенные в данной работе, могут быть полезны специалистам, проводящим зондовые измерения в низкотемпературной слабоионизованной плотной плазме. Описание конкретного зондового эксперимента и его результатов для случая установки зондового блока на боковой поверхности ГЛА дает представление об особенностях подобных исследований и о характерном распределении концентрации заряженных компонент плазмы вблизи боковой поверхности за время полета с учетом работы ЖРД и ионизации воздуха, проходящего через головную ударную волну.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ягодников Д.А., Рудинский А.В. Диагностика ракетных и реактивных двигателей по характеристикам собственного электромагнитного поля продуктов сгорания // ТВТ. 2017. Т. 55. № 5. С. 828.
2. Чан П., Тэлбот Л., Турян К. Электрические зонды в неподвижной и движущейся плазме (теория и применение). М.: Мир, 1972. 202 с.
3. Мустафаев А.С., Грабовский А.Ю. Новые возможности цилиндрического зонда в газоразрядной плазме // ТВТ. 2015. Т. 53. № 3. С. 347.
4. Кашеваров А.В. Характеристика зонда в движущейся столкновительной плазме для точки торможения потока // ТВТ. 2001. Т. 39. № 3. С. 381.
5. Андерс А., Ершов А.П., Исаев К.Ш., Тимофеев И.Б. Зондовая диагностика поздних стадий истечений плотной плазменной струи в атмосферу // ТВТ. 1987. Т. 25. № 4. С. 743.
6. Бенилов М.С., Рогов Б.В., Тирский Г.А. Теоретическое определение ионного тока насыщения на электрические зонды в дозвуковых потоках плазмы // ТВТ. 1981. Т. 19. № 5. С. 1031.
7. Бенилов М.С., Рогов Б.В., Тирский Г.А. Об ионном токе насыщения на электрический зонд в медленно движущейся плазме // ПМТФ. 1982. № 3. С. 5.
8. Кашеваров А.В. Вольт-амперная характеристика цилиндрического зонда Ленгмюра в плазме с присадкой // ТВТ. 1994. Т. 32. № 1. С. 12.
9. Алексеев Б.В., Котельников В.А. Зондовый метод диагностики плазмы. М.: Энергоатомиздат, 1988. 238 с.
10. Котельников М.В. Плоские электрические зонды: теория и приложения. М.: Изд-во МАИ, 2014. 184 с.
11. Котельников В.А., Котельников М.В. Зондовая диагностика плазменных потоков. Ижевск: НИЦ "Регулярная и хаотическая динамика", 2016. 440 с.
12. Котельников В.А., Котельников М.В., Филиппов Г.С. Диагностика плазменных потоков с помощью ориентированных зондов. Lambert Acad. Publ., 2016. 332 с.
13. Котельников В.А. К расчету плотности ионного тока на зонд в плотной слабо ионизованной плазме при условии тонкого слоя объемного заряда // Минск. ИФЖ. 1984. Т. XLVI. № 2. С. 322.
14. Савельев И.В. Курс физики. Т. 1. Механика. Молекулярная физика. СПб.: Лань, 2008. 352 с.
15. Пирумов У.Г., Росляков Г.С. Газовая динамика сопел. М.: Наука, 1990. 386 с.