

ФОТОГРАФИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПУЛЬСАЦИЙ В ПЛАЗМАТРОНАХ С ВОЗДУШНОЙ СТАБИЛИЗАЦИЕЙ

А. М. Трохан

(Новосибирск)

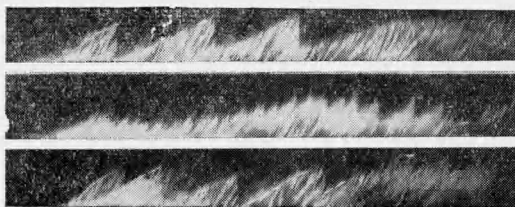
Применение оптических окон в виде различного рода щелей позволило провести ряд исследований по динамике горения в ракетных двигателях [1-4]. Используя щели, расположенные вдоль по потоку и поперек его, изучаются пульсации в плазматронах с воздушной стабилизацией, путем скоростной фоторегистрации на движущуюся пленку.

1. Исследование продольных пульсаций дуги. Дуга, горящая в линейном плазматроне с воздушной стабилизацией [5], не занимает какого-то фиксированного положения, а под влиянием обдувающего потока газа колеблется вдоль направления его движения. Эти продольные колебания были исследованы в работе [6].

Для уточнения характера пульсаций было предпринято фотографическое исследование. Для этого был изготовлен электрод с узкой продольной щелью. Центральная часть электрода, имеющая щель шириной 0,3 мм и длиной 120 мм, окружена охлаждающей водяной рубашкой. Щель закрыта пластиной из обычного силикатного стекла. Схема установки приведена на фиг. 1.

Изображение щели AB проектировалось при помощи объектива F на пленку, движущуюся в направлении, перпендикулярном оси электрода. Развертка производилась при помощи фоторегистра барабанного типа. Число оборотов барабана равнялось 50 об / сек, что контролировалось при помощи осциллографа. Экспозиция составляла 0,02 сек. В результате предварительных экспериментов было установлено, что характер пульсаций при данной конструкции плазматрона определяется только полярностью электродов и одинаков при питании как постоянным, так и переменным током промышленной частоты. В описываемых ниже экспериментах плазматрон работал на переменном токе. Это позволило за время одного оборота регистрировать горение дуги обеих полярностей при прочих идентичных условиях. Типичные регистрограммы приведены на фиг. 2. (Движение пленки справа налево; движение потока газа снизу вверх. Таким образом регистрограммы построены в координатах путь — время.)

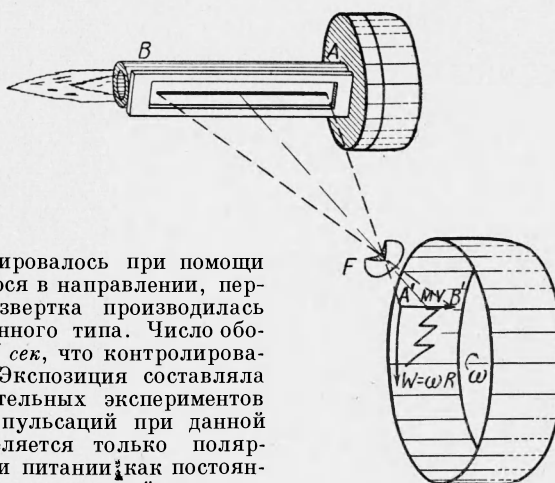
Верхняя регистрограмма соответствует полярности, при которой электрод является катодом. Как и ожидалось, при движении внутри электрода дуга при достижении определенной длины шунтируется. При этом образуется новый дуговой канал в сечении, лежащем выше по потоку. Сплошные линии, идущие местами вдоль кромки зубцов регистрограмм, являются следами катодного пятна, «садящегося» иногда на кромку щели и движущегося вдоль нее. Как видно из нижней регистрограммы, соответствующей той же полярности, длительно могут существовать одновременно два катодных пятна (расположенные на различных расстояниях): одно соответствует затухающему каналу, другое — разгорающемуся.



Фиг. 2

Средняя регистрограмма фиг. 2 соответствует другой полярности — электрод является анодом. Анодное пятно обладает значительно большей подвижностью. Оно гораздо реже и на более короткие промежутки времени «садится» на щель. Если частота пульсаций катодного пятна для данной конструкции и данных условий эксперимента составляет $1 \div 1.5$ кгц, то частота пульсаций анодного пятна равна $7 \div 10$ кгц.

Измерения проводились при кратковременных пусках. Затвор фоторегистра отсраивался во всех случаях через 2 сек после запуска.



Фиг. 1

В исследованных пределах амплитуда пульсаций катодного пятна слабо зависит от режима работы плазматрона. При заданном расходе воздуха через сопло частота пульсаций примерно линейно падает с ростом мощности. С ростом расхода частота пульсаций растет.

Для колебаний анодного пятна зависимости менее очевидны благодаря большому разбросу экспериментальных значений. Можно отметить лишь, что с ростом мощности при постоянном расходе область шунтирования анодного конца дуги смещается вверх по потоку.

Скорость смещения пятна при типичных условиях эксперимента составляла 140—150 м / сек для катода и 270—280 м / сек для анода при скорости ядра потока, равной 500—600 м / сек.

Как видно из регистрограмм фиг. 2, в тех случаях, когда катодное пятно «садится» на кромку щели, его движение носит непрерывный характер, так как здесь имеет место стабилизирующий эффект острой кромки (ввиду плохого теплоотвода).

При отсутствии щели перемещение катодного пятна происходит, по-видимому, скачками. На это кроме общих соображений [6] указывает также и то, что в некоторых случаях даже по кромке пятно движется скачками (фиг. 3, координаты те же, что и на фиг. 2).

Как и в случае крупномасштабных продольных пульсаций, при пульсациях на конце дуги могут иметь место случаи, когда длительное время сосуществуют два катодных пятна, движущихся каждое со своей скоростью (фиг. 4). На этой фотографии зарегистрированы два канала, горящие совместно в течение 150 мксек.



Фиг. 4

Возвращаясь к фиг. 2, обратим внимание на сложную колебательную структуру регистрограмм. Наличие этой «тонкой» структуры можно объяснить существованием высокочастотных поперечных колебаний столба дуги. С целью проверки этого предположения было проведено исследование столба дуги при помощи электрода с поперечными щелями.

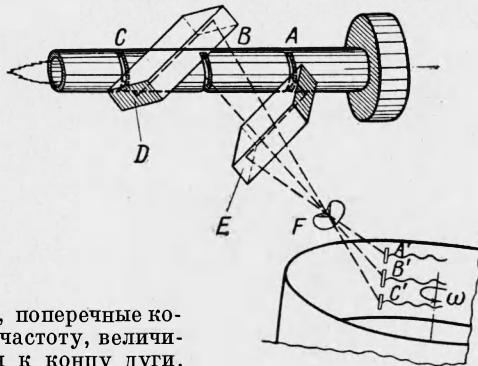
2. Исследование поперечных колебаний дуги в линейном плазматроне с воздушной стабилизацией. Схема эксперимента представлена на фиг. 5. В теле электрода профрезерованы три узкие поперечные щели *A*, *B* и *C*, закрытые снаружи во избежание перетекания воздуха прозрачными пластинами слюды. Расстояние между щелями составляло 39 мм.

При помощи оптической системы, состоящей из двух призм *D* и *E* и объектива *F*, изображения щелей проектируются на барабан с пленкой таким образом, что они оказываются расположенными вдоль одной образующей барабана, перпендикулярной оси электрода (*A'*, *B'*, *C'*). При вращении барабана происходит синхронная развертка свечения газа, находящегося за всеми тремя щелями.

Как показал эксперимент, свечение внутренней поверхности электродов, являющееся вредным фоном, невелико ввиду малого коэффициента отражения. В то же время яркость свечения поверхности электрода оказывается значительно большей, чем свечение газа, если на ней в данный момент находится дуговое пятно.

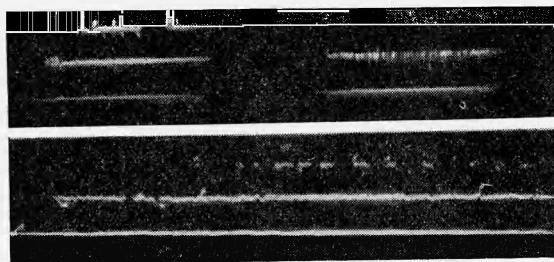
Это позволило осуществить синхронную визуализацию изменений положения дугового канала и электродных пятен в трех сечениях электрода.

Как показали проведенные измерения, поперечные колебания канала дуги имеют амплитуду и частоту, величина которых меняется по мере приближения к концу дуги. Вдали от конца амплитуда колебаний невелика и составляет 0.5 ÷ 1 мм, причем частота колебаний также мала (5—6 кгц при данных условиях эксперимента). Это говорит о том, что положение столба дуги вполне стабильно. По мере приближения к концу

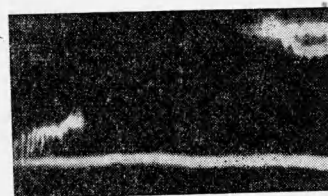


Фиг. 5

дуги, столб становится менее устойчивым. Амплитуда колебаний достигает величины, близкой к величине внутреннего радиуса электрода. Частота колебаний также растет, достигая величины в несколько десятков килогерц. Кстати, этот эффект может быть обнаружен также и из регистрограмм при продольном положении щели (фиг. 2).



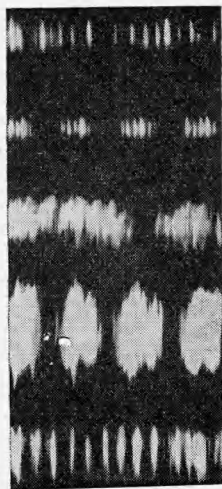
Фиг. 6



Фиг. 7

На фиг. 6 приведены типичные регистрограммы, полученные при питании плазматрона переменным током.

На верхней левой регистрограмме приведено горение катодного конца дуги. Шунтирование дуги происходит как раз в сечении третьей щели, что видно из верхней трассы. На правой регистрограмме видно шунтирование соответственно на анодном конце дуги. Видно, что шунтирование происходит значительно чаще и протекает в районе второй щели, т. е. дуга в данном случае короче. На нижней регистрограмме фиг. 6 (катодный конец дуги), снятой при большей скорости развертки, шунтирование происходит между второй и третьей щелями. Ясно видно увеличение амплитуды поперечных пульсаций в первом и втором сечениях в моменты времени, соответствующие укорочению дуги, т. е. тогда, когда щели оказываются расположенными вблизи конца дуги. Прогрев воздуха, текущего вдоль оси канала, увеличивается, поэтому по мере приближения к концу дуги толщина канала также увеличивается. Это видно, например, из сравнения толщины первой и второй трасс верхней левой регистрограммы.

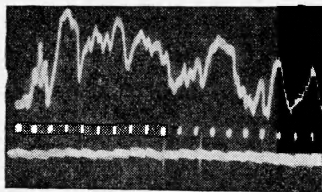


Фиг. 8

Кроме крупномасштабных продольных пульсаций имеют место также высокочастотные пульсации конца дуги. На наличие таких пульсаций уже указывалось в литературе [7].

Как показали измерения с продольной щелью, скорость смещения дуговых пятен в два-три раза меньше скорости газа в той же области. В то же время дуговой канал, будучи частью потока, движется со скоростью, равной или близкой к скорости всей среды. В результате на конце дуги постоянно образуются петли дугового канала. При вытягивании концевой петли создаются условия для ее шунтирования, что и происходит в действительности. Из измерений с продольной щелью найдено, что прогиб петли при условиях эксперимента достигал величины калибра электрода.

На фиг. 7 приведена увеличенная часть регистрограммы типа фиг. 6. На нижней трассе отчетливо видна серия шунтирований в концевой части дуги, происходящих с частотой 75 кгц. В процессе шунтирования не последнюю роль играют поперечные колебания столба дуги, на что указывает равенство частот шунтирования и поперечных колебаний в конечной части дугового столба.



Фиг. 9



Фиг. 10

3. **Исследование пульсаций светимости газа на выходе из сопла.** При движении дуги вместе с потоком газ прогревается сильно. При шунтировании дуги более коротким каналом между двумя горячими областями газа оказывается область, нагретая слабее. В результате этого, несмотря на диффузию внутри канала, газ на выходе из него состоит из чередующихся областей, относительно более горячих и более холодных. Светимость газа резко меняется с изменением его температуры, поэтому в факеле плазматрона должны иметь место пульсации светимости. Необходимо, однако, отметить, что, поскольку светимость зависит не только от температуры газа, но и от концентрации высвечивающих частиц, зависимость светимости от температуры оказывается достаточно сложной и неоднозначной.

Измерение пульсаций светимости газа у среза сопла также позволяет исследовать эффекты, вызываемые динамикой дугового столба. На фиг. 8 приведена серия регистрограмм светимости газа у среза сопла, полученных при развертке подобной фиг. 5, для различных плазматронов, работающих на разных режимах.

На таких регистрограммах может быть обнаружена как низкочастотная, так и высокочастотная составляющая пульсаций. Для сравнения на фиг. 9 дана осциллограмма светимости газа в линии меди 5105 ангстрем. Метки времени 100 мксек.

4. **Измерение пульсаций скорости газа.** Наличие пульсаций при горении дуги приводит к пульсации не только температуры, но также и скорости газа.

Были исследованы пульсации скорости газа в сопле одного из плазматронов при помощи методики, аналогичной изложенной в § 2. Для этой цели в сопле были сделаны две прозрачные щели, перпендикулярные оси и отстоящие одна от другой на расстоянии 42 мм. При помощи двух призм (аналогично фиг. 5) изображения этих щелей были совмещены вдоль одной прямой на движущейся пленке. На фиг. 10 приведен пример регистрограммы, полученной таким путем.

Как видно из приведенного примера, обе дорожки регистрограммы повторяют одна другую, однако с некоторым временным сдвигом. Зная это время и расстояние между щелями, можно найти скорость газа, среднюю на данном отрезке. Для нахождения времени пролета необходимо идентифицировать какие-либо детали на обеих дорожках и измерить расстояние между соответствующими парами вдоль направления развертки. Этот метод аналогичен [8,9] методу, используемому для этой цели шлейфовые осциллографы. На фиг. 11 приведен результат измерения скорости газа v [мсек^{-1}] для трех расходов, относящихся как $1 : 2 : 3$ при прочих равных условиях. Оказалось, что более горячие области газа соответствуют и более высокой скорости истечения. С ростом скорости относительная амплитуда колебаний падает.

Поступила 16 IX 1963

ЛИТЕРАТУРА

1. В е р м а н К., Л о г а н С. Combustion studies with a rocket motor having a full-length Observation window. J. Amer. Rocket Soc., 1952, vol. 22, No 2.
2. В е р м а н К., С ч а р г е с Е. Photographic techniques in jet propulsion studies. J. Amer. Rocket Soc., 1953, vol. 23, No 3.
3. В е р г е р е М., М о у т е т А., С а р р а т Р. L'évolution de la combustion dans une chambre de fusée à propergol liquide. Rev. gén. sci. appl. (Bruxelles), 1957, vol. 3, No 6.
4. Б а р р е р М., Ж о м о т т А., В е б е к Б. Ф., В а н д е н к е р к х о в е. Ж. Ракетные двигатели. Оборонгиз, 1962.
5. Д а у т о в Г. Ю., Ж у к о в М. Ф., С м о л я к о в В. Я. Исследование работы плазматрона с воздушной стабилизацией дуги. ПМТФ, 1961, № 6.
6. С м о л я к о в В. Я. О некоторых особенностях горения дуги в плазматроне постоянного тока. ПМТФ, 1963, № 6.
7. Д у л е й, М а к г р е г о р, Б р ю й е р. Характеристики дуги в плазменном генераторе типа Гердиена. Ракетная техника, 1962, 32, № 9.
8. F r e e m a n M. P., L i S. U., J a s k o w s k y W. Velocity of propagation and nature of luminosity fluctuations in a plasma jet. J. Appl. Phys., 1952, vol. 33, No 9.
9. Б л е к м а н В. Х. Исследование стационарного магнитогидродинамического потока, в кн. Ионные, плазменные и дуговые ракетные двигатели. Гос. издат. литературы в обл. атомной науки и техн., 1961, 227—242.