

## Л и т е р а т у р а

Г. Н е с и с Е.И. Кипение жидкостей - УФН, 87, 1965, вып.4, с.615-653.

УДК 533.9.08

А.И. Ф е д о с о в, О.А. Ж у р а в л е в

### ПРИМЕНЕНИЕ МЕХАНОТРОННЫХ ДАТЧИКОВ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СИЛЫ РЕАКЦИИ ПЛАЗМЕННОЙ СТРУИ

Одной из характеристик плазменных ускорителей непрерывного действия является сила реакции истекающей струи. Для измерения силы реакции плазменной струи применяются стационарные устройства, подобные описанному в работе [1]. Сложность такого устройства, трудности его применения, значительные габаритные размеры приводят к необходимости создания простого и малогабаритного датчика, с помощью которого можно проводить оценочные измерения силы реакции струи. При проносе такого датчика через струю можно получить еще одну важную характеристику - распределение скоростного напора  $\frac{\rho v^2}{2}$  струи по радиусу  $z$  ( $\rho$  и  $v$  - соответственно плотность и скорость струи).

Характеристики приемников полного напора (трубок Пито) в режимах течения с  $\lambda \gg d$  ( $\lambda$  - длина свободного пробега частиц,  $d$  - диаметр зонда), при больших градиентах температуры, существовании рекомбинационных процессов и наличии адсорбционных слоев изучены недостаточно. В таких условиях отклонения величин от соотношений, полученных для сплошной среды, могут достигать нескольких порядков.

Для измерения  $\frac{\rho v^2}{2}(z)$  используются устройства, у которых в плазменную струю вводится лишь приемный элемент (ловушка). Силовое воздействие струи на ловушку определяется по показаниям термостатируемого тензометрического датчика, соединяемого с усилителем и потенциометром. Однако применение тензометрических датчиков связано с известными трудностями.

Характеристики измерительного устройства в целом (например, чувствительность) определяются не только параметрами самого тензодатчика, но и свойствами базовой поверхности устройства, применяя -

емого клея, технологией приклейки датчика.

Для получения распределений  $\frac{\rho v^2}{2} (z)$  в плазменной струе ускорителя [2], работающего на парах щелочного металла, были разработаны датчики на основе электронно-механических преобразователей - механотронов.

Широкое использование механотронов в измерительной технике вызвано их высокой чувствительностью к перемещениям и силам, линейностью рабочих характеристик, стабильностью показаний [3]. В данном случае датчики с механотронами должны были работать в сложных условиях: при воздействии тепловых потоков плазменной струи, наличии внешнего магнитного поля, создаваемого катушкой ускорителя (индукция магнитного поля  $B \approx 0,1 \text{ Тл}$ ), низком давлении в вакуумной камере ( $p \approx 10^{-2} \text{ Н/м}^2$ ).

Предварительные исследования характеристик механотронов типов 6МХ1С, 6МХ3С, 6МХ4С и 6МХ2Б показали, что начальный  $U_n$ , так и тепловой  $U_T$  дрейфы их полезного сигнала пропорциональны увеличению напряжения внода  $U_a$ .

Механотроны типа 6МХ2Б при одинаковом  $U_a$  имели меньшие  $U_n$  и  $U_T$ , чем механотроны других типов.

Как отмечалось в работе [3], у механотронов типов 6МХ1С, 6М3С и 6МХ4С наблюдается увеличение чувствительности к силам с уменьшением давления окружающей среды. Подобный эффект у механотронов 6МХ2Б не был обнаружен. Более того, чувствительность к силам у них оставалась постоянной с изменением температуры корпуса механотрона в диапазоне от +5 до +80°C, индукции внешнего магнитного поля  $B$  от 0 до 0,1 Т. Механотроны 6МХ2Б имеют лучшие резонансные характеристики (собственная резонансная частота  $f_0 = 650 \text{ Гц}$ ), чем остальные.

Все это послужило основанием для предпочтительного применения этих механотронов в качестве чувствительного элемента датчиков (датчики с другими типами механотронов также применялись в проведенных измерениях).

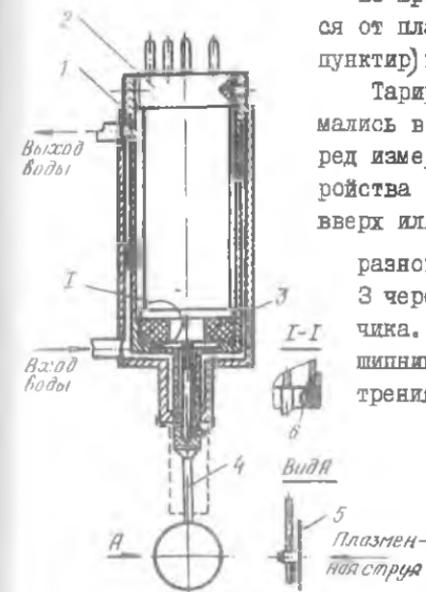
Разработанный датчик (рис.1) состоит из охлаждаемого водой корпуса 1, в котором устанавливался механотрон 2 по фторопластовому кольцу 3. Корпус изготавливался из стали Армко и экранировал механотрон от воздействия внешнего магнитного поля. Переходник 4 с приемной пластиной 5 крепился непосредственно на штыре механотрона. Титановый переходник 4 имел массу от 0,5 до 5 г (в зависимости от его длины  $L$ ) и играл роль силового плеча, определяя чувствительность датчика, его частотные характеристики. За очет переходника 4, длина ко

того при некоторых измерениях составляла  $\angle = 70$  мм, при снятии профилей  $\frac{P_{\text{в}}}{P}$  (2) можно было не вводить корпус датчика в струю, уменьшая тем самым воздействие датчика на плазменный поток и температурный дрейф полезного сигнала механотрона.

Во время измерений переходник 4 защищался от плазменного потока экраном (см. рис. 1, пунктир) в виде металлической трубки.

Тарировочные характеристики датчиков снимались в вакуумной камере непосредственно перед измерениями с помощью специального устройства (рис. 2). Каретка I, перемещаясь вверх или вниз, изменяла массу образцовых

разновесов 2, подвешенных с помощью нити 3 через блок 4 к приемной пластине 5 датчика. Применение в блоке 4 агатового подшипника позволило уменьшить коэффициент трения в узле до 0,01. Каретка I получала привод от электродвигателя с редуктором 6. За один ход каретки масса разновесов менялась от 0 до 200 мг, проходя номиналы 0, 25, 50, 100, 150 и 200 мг. Независимо от степеней разрежения в вакуумной камере нелинейность тарированных характеристик при данном диапазоне усилий была менее 3%. После проведения тарировок датчик освобождался от нити с разновесами с помощью

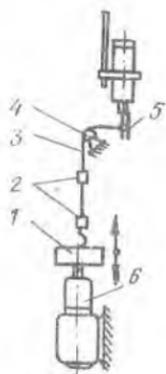


Р и с. 1. Общий вид механотронного датчика

термического ножа.

Электрическую схему измерительного устройства (рис. 3) условно можно разбить на следующие блоки: А - блок стабилизации и преобразования напряжения; Б - измерительный блок; В - блок термокомпенсации. Блок А собран по типовой схеме включения механотронов и состоит из стабилизатора  $C_T$ , силового трансформатора  $Tr$ , выпрямителя на кремниевых диодах  $D_1-D_4$ . Делитель  $R_1, R_2$  служит для выбора номинального напряжения питания анодов механотрона. В измерительном блоке применена мостовая симметричная схема, включающая анодные нагрузки  $R_3, R_4$ , потенциометры грубой  $R_5$  и тонкой  $R_6$  балансировки. Сигнал с механотрона подается на вход "у" осциллографа С1-1В. Синхронизация развёртки осциллографа с началом проноса датчика через плазмен-

ную струю производится концевыми переключателями  $K_1, K_2$ . Блок термокомпенсации исключает температурную нестабильность нуля выходного сигнала датчика при измерениях, если температура мембраны механотрона изменилась не более, чем на  $\pm 5^\circ\text{C}$ . Схема компенсации состоит из



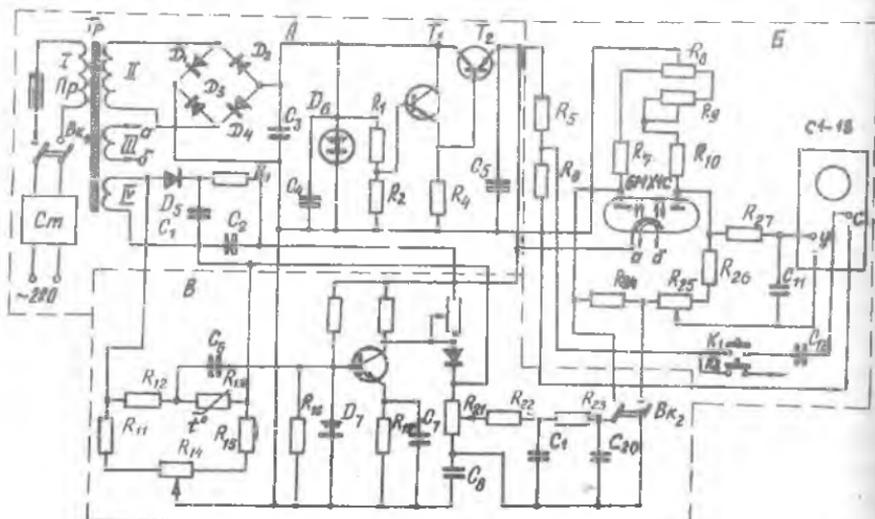
Р и с. 2. Схема тарифовочного устройства

резисторов  $R_7, R_8$  и  $R_9$  и термистора  $R_{10}$  типа КМТ-17а (см. рис. 1, поз. 6), составляющих плечи моста. Потенциометр  $R_{11}$  служит для начальной балансировки моста. Напряжение разбаланса моста поступает на интегрирующий фильтр  $R_{12} C_1; R_{13} C_2$  и дальше на компенсационный резистор  $R_{14}$ .

Для определения частотных характеристик механотронных датчиков совместно с измерительной аппаратурой применялся пневматический пульсатор. Амплитудно-частотные характеристики снимались на воздухе по индукционному датчику давления типа ПДИ, собственная частота которого превышала 500 Гц.

Кривые 1, 2 и 3 (рис. 4) соответствуют датчику с механотроном 6МХ1С, причем, кривая 1 получена при свободном штыре; 2 - с закрепленным на штыре переходником  $L = 20$  мм и пластиной диаметром

$d = 18$  мм; 3 - с переходником  $L = 70$  мм и пластиной  $d = 8$  мм.



Р и с. 3. Электрическая схема измерительного устройства

Кривая 4 относится к стационарному датчику с механотроном (МХ4С и приемной пластиной диаметром  $d = 160$  мм, выполненной из титановой фольги и укрепленной непосредственно на штыре механотрона (такая ловушка полностью перекрывала плазменную струю на расстоянии от среза анода  $z \leq 200$  мм). Минимальная частота собственных колебаний датчиков с механотронами типа 6МХ2Б составила  $f_0 = 150 - 200$  Гц (переходник  $L = 70$  мм, пластина  $d = 10$  мм).

Следует отметить, что в данных измерениях не требовались высокие резонансные характеристики датчиков. Как показали измерения, проведенные с помощью электростатических зондов [2], в струе ускорителя отсутствовали пульсации ионного и электронного токов. Ускоритель характеризовался хорошей стабильностью и повторяемостью рабочих характеристик.

Методика измерений основывается на определении силы реакции плохо обтекаемого тела (пластины), введенного в плазменный поток. Сила, действующая на единицу площади небольшой плоской пластины, перпендикулярной потоку, как известно, равна

$$f(z) = C \frac{\rho v^2}{2}(z), \quad (1)$$

где  $C$  - коэффициент лобового сопротивления пластины,

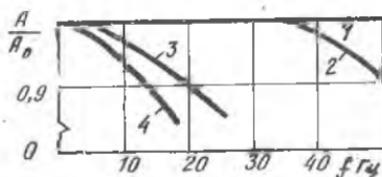
Интегрируя функцию  $f(z)$ , полученную для данного сечения потока, можно определить силу реакции струи в приближении молекулярного течения газа из выражения [4]

$$F = \left[1 + \frac{1}{\gamma M^2}\right] \int_0^z f(z) \frac{4}{C} \pi z dz, \quad (2)$$

где  $\gamma$  - отношение теплоемкостей;  
 $M$  - число Маха.

Как показано в работе [5], струя исследуемого ускорителя имела  $M \geq 3$ , следовательно, в выражении (2) можно принять, что  $\left[1 + \frac{1}{\gamma M^2}\right] = 1$ .

Существенную погрешность в результате измерения действительных  $f(z)$  и  $F$  может вносить неопределенность коэффициента  $C$ . Величина коэффициента  $C$  зависит от характера взаимодействия плазменной



Р и с. 4. Частотные характеристики датчиков

струи с поверхностью приемной пластины датчика, имеющей некоторый электрический потенциал.

Плазменная задача существенно сложнее задачи обтекания пластины газом из нейтральных частиц. Специфические особенности ее следующие:

силовое взаимодействие пластины с потоком происходит не только при непосредственном столкновении частиц с поверхностью, но и через электромагнитное поле, порождаемое присутствием тела;

значение напряженности электрического и магнитного полей в области возмущения зависят от параметров плазмы в этой области.

В работе [6] был рассмотрен вопрос о механизме взаимодействия положительно заряженных ионов с металлическими поверхностями. В ходе исследования выяснилось, что

газовые ионы с вероятностью, близкой к единице, нейтрализуются. Нейтрализация происходит на расстояниях в несколько атомных радиусов от поверхности.

Все это говорит о том, что с поверхностью пластины сталкиваются уже нейтрализовавшиеся частицы, скорость которых равна скорости ионов в момент нейтрализации.

Как известно из теории молекулярного течения газов (число Кнудсена  $K_n \gg 1$ ) в предельном случае, когда

$$\frac{1}{\lambda} m v^2 \gg k T$$

при обтекании холодной пластины и коэффициенте аккомодации  $\beta = 1$ , коэффициент лобового сопротивления равен [7]

$$C = \frac{2F}{\rho v^2 S} = 2,$$

где  $m$  и  $T$  - соответственно масса и температура частиц;  
 $S$  - площадь пластины.

В данном случае приемная пластина датчика помещалась в поток металлической (калиевой) плазмы ускорителя. Несмотря на то, что обтекание пластины характеризовалось числом  $K_n \gg 1$ , коэффициент сопротивления  $C$  принимался равным 2. Это связано с тем, что как показано в работе [8], потоки металлической плазмы должны полностью конденсироваться на холодной поверхности пластины, расположенной перпендикулярно оси струи. Это экспериментально подтверждается хорошей сходимостью результатов измерения  $f(z)$  и  $F$ , проведенных с помощью датчиков, имеющих приемные пластины различной формы.

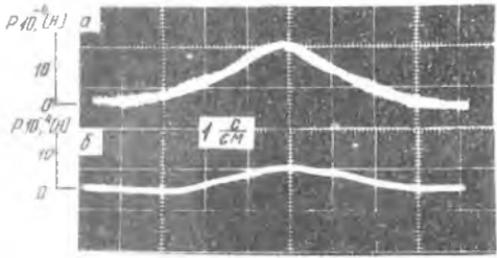
Соотношение (2) для расчета силы реакции струи в условиях проведенных измерений имело вид

$$I = 2\pi \int_0^{\infty} \rho v^2 z dz$$

(3)

Профили  $\frac{\rho v^2}{2}(z)$  снимались за один проход приемной пластины датчика через струю ускорителя.

Двухкоординатный электропривод позволял проносить датчик вдоль и перпендикулярно оси струи при ходе координатника, соответственно на 100 мм и  $\pm 200$  мм. Скорость провеса пластины через струю при непрерывной записи профиля составляла 45 мм/с. Типичные осциллограммы изменения усилий на приемной пластине, полученные за один пронос датчика при различных режимах работы ускорителя, представляют собой симметричные относительно оси струи кривые (рис. 5а,б). Отсутствие смещений нулевых линий на осциллограммах говорит о том, что рубашка охлаждения корпуса датчика надежно термостатировала механотроны.

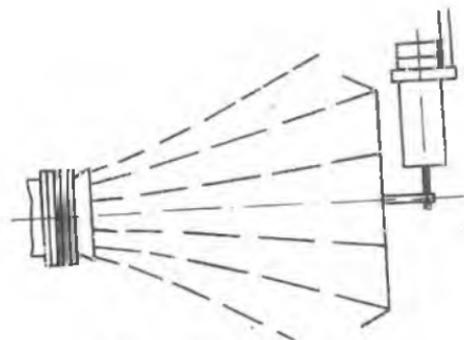


г и с. 5. Осциллограммы усилий на приемной пластине, полученные за один пронос датчика через струю: а - z = 160 мм, б - z = 250 мм

Суммарную погрешность измерения распределения  $\frac{\rho v^2}{2}(z)$  плазменной струи механотронными датчиками можно условно разделить на две части: инструментальную и методическую.

- Величина инструментальной погрешности определяется
  - нелинейностью тарировочных характеристик механотрона ( $\pm 2\%$ );
  - нестабильностью показаний механотрона ( $\pm 1\%$ );
  - электромагнитными наводками в измерительных проводах ( $\pm 1\%$ ).

Под методической подразумевается погрешность, зависящая от точности определения коэффициента С приемной пластины датчика в плазменной струе. Величина коэффициента С зависит от характера взаимодействия плазменного потока с ловушкой датчика, от угла атаки  $\theta$  ( $\theta$  - угол между вектором  $\vec{V}$  плазмы и плоскостью поверхности приемной пластины).



Р и с. 6. Схема механотронного датчика с ловушкой диаметром 160 мм

В данной работе коэффициент  $C$  определялся также экспериментально. Для этого сравнивались значения силы реакции струи  $F$ , полученные проносными механотронными датчиками [интегрируя  $\rho v^\alpha(z)$ ], по формуле (3) и измерительным устройством на базе механотрона с приемной пластиной  $\alpha = 160$  мм (рис. 6) для одного и того же сечения струи. Измерения показали, что значения  $F$ , полученные двумя методами, различались не более, чем на 10% при коэффициенте  $C = 2$ .

Таким образом, полученные результаты показывают, что разработанные на основе механотронов датчики и предложенная методика определения  $S \frac{v^2}{2}(z)$  и  $F$  струи, могут применяться для качественных и количественных оценок параметров ускорителей, работающих на парах металлов.

#### Л и т е р а т у р а

1. А г е е в Л.И. и др. Устройство для измерения силы реакции плазменной струи. - "Измерительная техника", 1973, № 2, с.32-33.
2. Ж у р а в л е в С.А. и др. Зондовые исследования струи плазменного ускорителя с внешним магнитным полем. - В сб.: Материалы II Всесоюзной конференции по плазменным ускорителям. Минск, 1973, с. 223-224.

10. Берлиня Г.С. Электронные приборы с механически управляемыми электродами. М., "Энергия", 1971.
11. Патрин, Шнейдерман. Некоторые характеристики ускорителя с магнитной кольцевой дугой. - "Ракетная техника и космонавтика", 1966, № 2, с.1012-1016.
12. Журавлев О.А. и др. Экспериментальное исследование струи плазменного ускорителя с внешним магнитным полем. - В сб.: Материалы II Всесоюзной конференции по плазменным ускорителям, Минск, 1973, с. 221-222.
13. Филиппов Б.В. Обтекание тел разреженной плазмой. - В сб.: Аэродинамика разреженных газов. Изд. ЛГУ, 1969, вып.1У, с.133-141.
14. Коган М.Н. Динамика разреженного газа. М., "Наука", 1967.
15. Чекалин Э.К., Шуманов В.С. Истечение струи металлической плазмы в вакуум. - В сб.: Исследования по физической газодинамике. М., "Наука", 1966, с.101-108.
16. Курншев А.П. и др. Влияние тепловых скоростей ионов на аэродинамические характеристики тел в разреженной плазме. - В сб.: Аэродинамика разреженных газов. Изд. ЛГУ, 1969, вып.1У, с. 149-162.

УДК 532.516

И.И. Саньков

#### РАДИАЛЬНОЕ ТЕЧЕНИЕ ЖИДКОСТИ В ЗАЗОРЕ МЕЖДУ БРАЩАЮЩИМСЯ И НЕПОДВИЖНЫМ ДИСКОМ

Рассмотрим осесимметричное течение вязкой несжимаемой жидкости в зазоре между двумя параллельными коаксиальными дисками внешнего ра-