

Ламинарный пограничный слой в потоке инертного газа в плазмотроне

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»

Рассмотрено вязкое течение защитного инертного газа в плазмотроне. Продуваемый со стороны катода через канал выброса плазмы защитный инертный газ выполняет роль газодинамического затвора, отравляющего катод атмосферного воздуха. При малых массовых расходах газа (малом числе Рейнольдса) течение в канале выброса ламинарное. Для вязкого течения ламинарный пограничный слой у стенок определяет распределение продольных скоростей по радиусу цилиндрического канала газодинамического затвора как на «начальном» - переходном, так и на «основном» участках его длины. Предложена методика расчёта распределения продольных скоростей, основанная на результатах экспериментального изучения вязких течений в круглых трубах.

Ключевые слова: плазма, канал выброса плазмы, плазмотрон, газодинамический затвор, ламинарный поток, защитный газ, пограничный слой.

Введение

Теория идеального газа хорошо описывает картину действительных течений в областях удалённых от стенок. У поверхности стенок существенна роль сил вязкости, которые определяют распределение скоростей в канале течения. При ламинарном слоистом течении вязких газов слои по мере приближения к стенкам постепенно притормаживаются, теряя свою направленную скорость движения. Этот макро-слой вблизи стенки каналов носит название пограничного слоя, который существенно влияет на распределение продольных скоростей.

Распределение продольных скоростей в потоке защитного газа на участке газодинамического затвора

Поток защитного инертного газа, продуваемый через плазмотрон со стороны катода, препятствует встречному диффузионному натеканию отравляющего катод атмосферного воздуха через канал выброса плазмы, выполняя функции газодинамического затвора атмосферного воздуха в плазмотроне. Эффективность защиты катода в первую очередь зависит от распределения продольных скоростей в поперечных сечениях потока защитного газа на длине газодинамического затвора. Если защитный газ втекает в цилиндрический канал выброса плазмы с постоянной скоростью по сечению канала, то дальше на стенках формируется турбулентный или ламинарный пограничный слой. При малых расходах защитного газа на уровне $M = 10^{-5} \dots 10^{-2}$ кг/с (малых числах Рейнольдса $Re < 2300$) течение и пограничный слой ламинарные. Толщина пограничного слоя δ увеличивается вдоль длины канала и на некотором расстоянии l_n от входа в канал выброса толщина пограничного слоя становится равной радиусу канала. В этом месте происходит смыкание пограничных слоев на оси цилиндрического канала. В дальнейшем l_n будет обозначать длину переходного «начального» участка течения. Остальная часть длины канала l_0 по принятой терминологии называется «основным» участком. На «основ-

ном» участке l_0 течение можно считать установившимся, когда распределение продольных скоростей по радиусу не зависит от продольной координаты z и описывается параболическим законом Хагена – Пуазейля [1]

$$V = V_{max} \left(1 - \frac{r^2}{R^2} \right), \quad (1)$$

где R – радиус канала, V_{max} – амплитуда скорости на оси канала в установившемся режиме течения.

На «начальном» участке продольная скорость V зависит от координаты z и радиуса канала r , изменяясь вдоль z от значения V_{cp} на входе в канал выброса до значения, которое зависит от отношения r/R . Картина течения на начальном участке газодинамического затвора наиболее достоверно может быть описана профилем продольных скоростей на основе измерения их в цилиндрических каналах, проведенных Никурадзе [2]. Результаты этих экспериментов представлены на Рис.1 в виде параметрических зависимостей безразмерной продольной скорости V/V_{cp} как функции безразмерной длины канала $z\nu/(R^2V_{cp})$ (ν – кинематическая вязкость защитного газа). Параметром таких зависимостей является безразмерный радиус r/R .

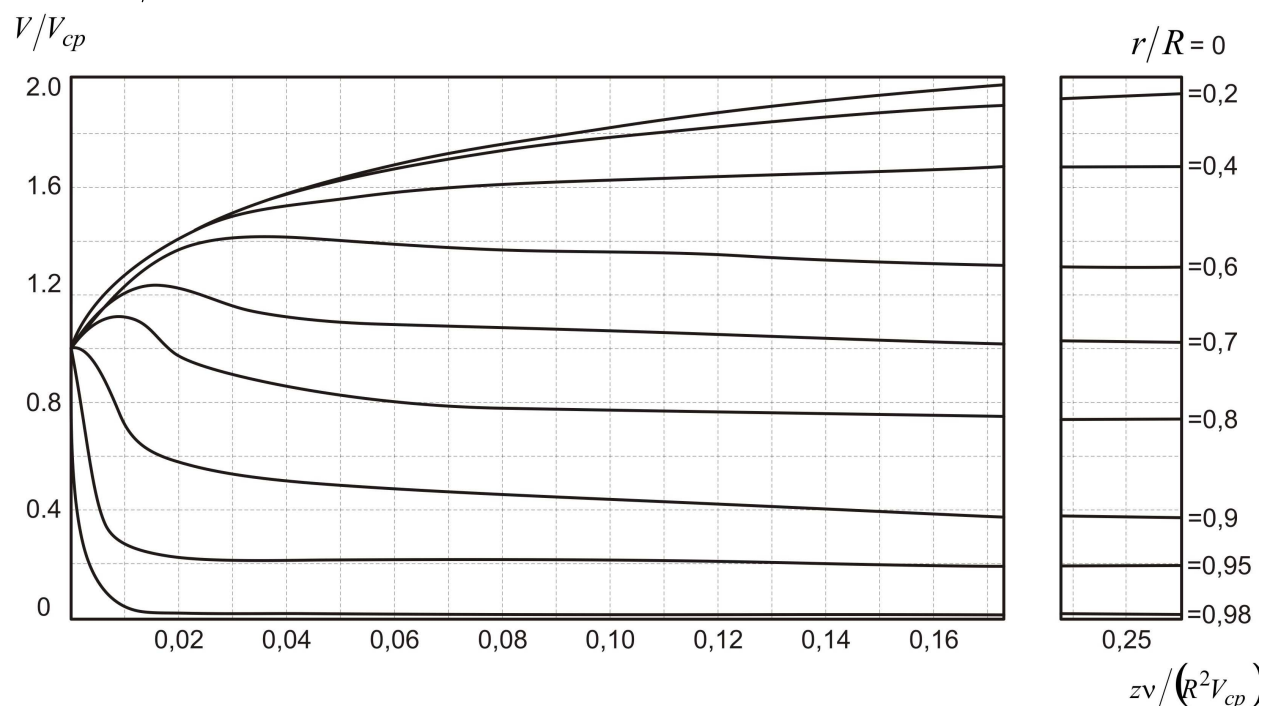


Рис. 1. Распределение скоростей в начальном участке круглой трубы при ламинарном течении (измерения по Никурадзе [2])

В распределении продольных скоростей вдоль длины канала прослеживаются следующие закономерности:

1) так как массовый расход защитного газа остается постоянным вдоль канала, то в каждом сечении сохраняется и средняя скорость течения V_{cp} ;

2) на входе в канал выброса со стороны катода продольные скорости равны для любого соотношения r/R ($V/V_{cp} = 1$ при $z = 0$);

3) по мере движения вязкого течения по каналу газ, сосредоточенный у стенок $r = (0,7 \div 0,1) R$ тормозится ($V/V_{cp} = 1$);

4) экспериментальные параметрические зависимости, представленные на рис. 1, являются универсальными. Это означает, что используя их, возможно построить распределение продольных скоростей для любого сечения вдоль длины канала выброса z в потоке с произвольной комбинацией параметров ν , R , z , V_{cp} и массовым расходом газа M (кг/с). Средняя по сечению скорость газа V_{cp} связана с массовым расходом M соотношением

$$V_{cp} = \frac{M \mathfrak{R} T}{\pi \mu R^2 P}, \quad (2)$$

где $\mathfrak{R} = 8,31$ Дж/К, $\mu = 0,04$ кг/моль – молярный вес защитного газа Ar , $T(R)$ – температура защитного газа, $P = 1,05 \cdot 10^5$ Па – давление защитного газа в незамкнутом объеме при температуре T .

Для цилиндрических каналов число Рейнольдса равно

$$Re = \frac{V_{cp} \cdot d}{\nu}, \quad (3)$$

где d – диаметр канала выброса плазмы, ν – кинематическая вязкость защитного газа при температуре T .

Протяжённость переходного «начального» участка l_H при ламинарном течении, отсчитываемая от торца канала выброса со стороны катода, связана с параметрами течения соотношением [1]

$$l_H = 0,03 d Re. \quad (4)$$

В плазмотронах с осевой дугой стабилизированной водоохлаждаемой стенкой канала выброса среднемассовая температура нагретого газа на выходе плазмотрона равна 7000 К [3], со средней по длине канала температурой 3500 К.

Уравнения (1) – (4) вместе с универсальными экспериментальными параметрическими зависимостями (рис. 1) позволяют провести расчеты параметров вязкого течения защитного газа и построить распределение скоростей на «начальном» и «основном» участках его течения. Результаты представлены в табл. 1 и на рис. 2.

Основные результаты расчетов можно сформулировать в виде следующих положений:

1) в вязком течении защитного инертного газа на длине газодинамического затвора формируется переходной «начальный» участок неустановившегося течения протяженностью l_H . На нем происходит перераспределение продольных скоростей по сечению цилиндрического канала от равномерного $V = V_{cp}$ на входе в канал затвора до параболического к концу «начального» участка. Такое распределение скоростей сохраняется и далее на «основном» участке течения газа, как в режиме продувки, так и в рабочем режиме плазмотрона;

2) уменьшение скорости направленного движения в пристеночном пограничном кольцевом слое шириной $\delta = (1 \div 0,7) r/R$ от значения $V = V_{cp}$ при $z = 0$ до $V = 0$ при $z = l_H$ сопровождается возрастанием скорости в ядре потока

($0 \div 0,7$) r/R от значения $V = V_{cp}$ при $z = 0$ до значения $V_{max} = 2V_{cp}$ при $z = l_H$ на оси канала;

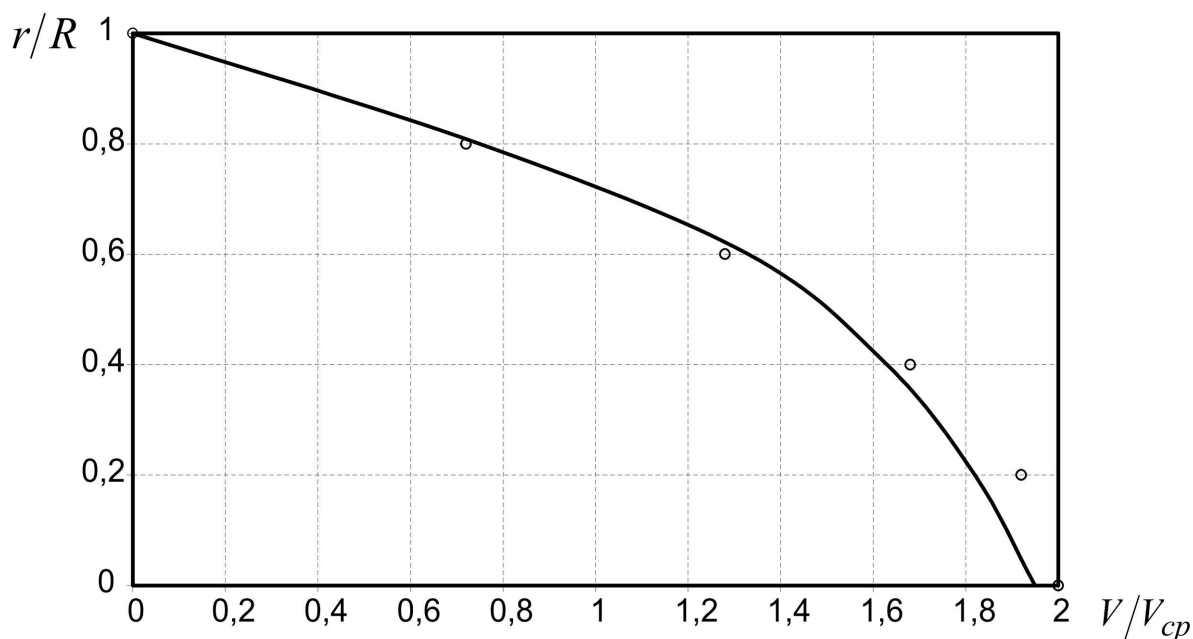
3) полученное к концу «начального» участка ($z = l_H$) распределение продольных скоростей остается неизменным и на «основном» участке течения;

4) для исследуемого плазмотрона с защитным инертным газом Ar протяжённость переходного «начального» участка $l_H = 2,6$ см при общей длине канала 9 см;

5) хорошее совпадение профилей продольных скоростей, построенных по экспериментальным параметрическим зависимостям и по теоретической формуле Хагена–Пуазейля, подтверждает возможность использования универсальных параметрических зависимостей для анализа вязкого течения защитного газа на переходном «начальном» и «основном» участках в канале газодинамического затвора атмосферного воздуха в плазмотронах.

Таблица 1 – Параметры потока инертного газа Ar на участке газодинамического затвора

№	Параметр	Формула	Продувка Ar	Рабочий режим
1	Радиус канала газодинамического затвора	R (м)	0,0225	0,0225
2	Защитный газ – аргон	μ (кг/моль)	0,04	0,04
3	Средняя температура по длине затвора	T (К)	300	3500
4	Массовый расход Ar	M (кг/с)	$3,82 \cdot 10^{-5}$	$3,82 \cdot 10^{-5}$
5	Давление Ar	P (Па)	$1,05 \cdot 10^5$	$1,05 \cdot 10^5$
6	Средняя скорость	$V_{cp} = \frac{M\sqrt{T}}{\pi\mu R^2 P}$ (м/с)	0,03	0,35
7	Максимальная скорость на оси «основного» участка	$V_{max} = 2V_{cp}$ (м/с)	0,06	0,7
8	Число Рейнольдса	$Re = \frac{V_{cp}d}{\nu}$	38	18,1
9	Кинематическая вязкость	ν (м ² /с)	$3,56 \cdot 10^{-5}$	$8,72 \cdot 10^{-4}$
10	Длина «начального» участка	l_H (м)	0,051	0,026
11	Граница «начального» участка в безразмерных координатах	$\frac{l_H}{R^2 \cdot V_{cp} / \nu}$	0,12	0,128



R – радиус канала выброса нагретого газа, V_{cp} – средняя продольная скорость Ar на входе в канал выброса нагретого газа; — – профиль продольных скоростей, построенный по универсальным параметрическим зависимостям на входе «основного» участка течения [2] $z = l_H$, \circ – значения по закону Хагена–Пуазейля (1)

Рис.2 Профиль скоростей на установившемся «основном» участке течения в канале плазмотрона

Заключение

1. Поток защитного инертного газа, движущийся в канале выброса нагретого газа из плазмотрона, выполняет функции газодинамического затвора атмосферного воздуха. Такой встречный поток препятствует диффузионному натеканию отравляющей катод атмосферы, что и определяет интерес к изучению распределения продольных скоростей в таком канале газодинамического затвора.

2. В плазмотронах с дугой, стабилизированной стенкой цилиндрического канала, охлаждаемой водой, вязкое течение защитного газа Ar на длине канала формирует «начальный» переходной и «основной» участки течения, отличающиеся распределением продольных скоростей по длине.

3. Поскольку значение числа Рейнольдса значительно меньше критического ($Re_{кр} = 2300$) для цилиндрических каналов, течение на участке газодинамического затвора носит ламинарный характер в подготовительном и рабочем режимах работы плазмотрона.

4. Распределение продольных скоростей в потоке защитного инертного газа по радиусу канала выброса нагретого газа, выполняющего функцию газодинамического затвора атмосферного воздуха, является основной характеристикой при расчетах диффузионного натекания отравляющей атмосферы и определения величины парциального давления атмосферных газов в области катода плазмотрона.

Список литературы

1. Абрамович Г.Н. Прикладная газовая динамика / Г.Н. Абрамович. – М.: Наука, 1969. – 824с.
2. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя / Г. Шлихтинг. – М.: Наука, 1969. – 740с.
3. Жуков М.Ф. Электродуговые нагреватели газа (плазмотроны) / М.Ф. Жуков, В.Я. Смоляков, Б.А. Урюков. – М.: Наука, 1973. – 332с.

Рецензент: д. т. н., профессор А.И. Долматов, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков

Поступила в редакцию 15.04.10

Ламінарний прикордонний шар у потоці інертного газу в плазмотроні

Розглянуто в'язку течію захисного інертного газу в плазмотроні. Захисний інертний газ, який продувається з боку катода через канал викиду плазми, виконує роль газодинамічного затвору атмосферного повітря, що отруєє катод. При малих масових витратах газу (малому числі Рейнольдса) течія в каналі викиду ламінарна. Для в'язкої течії ламінарний прикордонний шар у стінок визначає розподіл поздовжніх швидкостей по радіусу циліндричного каналу газодинамічного затвору як на «початковому» - перехідному, так і на «основному» ділянках його довжини. Запропоновано методику розрахунку розподілу поздовжніх швидкостей, основу на результатах експериментального вивчення вузьких течій у круглих трубах.

Ключові слова: плазма, канал викиду плазми, плазмотрон, газодинамічний затвор, ламінарний потік, захисний газ, прикордонний шар.

Laminar boundary layer in the stream of rare gas in plasmotrone

The viscid flow of protective rare gas is considered in plasmotrone. Blown through from the side of cathode through the channel of the troop landing of plasma protective rare gas is executed by the role of gas-dynamic breech-block of poisoning a cathode atmospheric air. At the small mass charges of gas (small number of Reynolds) a flow in the channel of the troop landing laminar. For a viscid flow a laminar boundary layer at walls determines distributing of longitudinal speeds on the radius of cylindrical channel of gas-dynamic breech-block both on «initial» - transitional and on «basic» areas of his length. The method of calculation of distributing of longitudinal speeds is offered, based on the results of experimental study of viscid flows in round pipes.

Keywords: plasma, channel of the troop landing of plasma, plasmotron, gas-dynamic breech-block, laminar stream, protective gas, boundary layer.