

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МЕСТА РАЗМЕЩЕНИЯ ДЕТАЛИ НА ПЛОСКОЙ ПОДЛОЖКЕ НА ПЛОТНОСТЬ ТОКА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ УГЛАХ ПАДЕНИЯ ИОНОВ ДЛЯ ПЛАЗМЕННО-ИОННОЙ ОБРАБОТКИ

*Г.И. Костюк, проф., д-р техн. наук, С.А. Романенко,*

*Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского "ХАИ",*

*Н.Л. Белов, В.И. Решетников, ПО завод им. Малышева, г. Харьков, Украина*

### 1. Введение

Угол падения иона на поверхность детали определяет величину коэффициента распыления и, например, при углах вблизи 60 градусов становится максимальным, т.е. определяет величину уносимой массы с детали, а значит и влияет на производительность обработки. В случае ионного полирования, ионного фрезерования и очистки повышается производительность при углах близких углу, соответствующему максимальному распылению, а в случае нанесения покрытия снижает производительность. Все это говорит о важности и актуальности исследования влияния места размещения детали на характер распределения плотности ионного тока по угловой координате.

Работы в этом направлении были связаны с выполнением исследований по программе 625 «Плазменно-ионные технологии», «Прогрессивные технологии и РТК в машиностроении» (Руководитель академик Колесников К.С.) в СССР, развивались в программах ГКНТ Украины по фонду фундаментальных исследований проект 4616, в программах Министерства науки и образования «Создание поверхностных слоев с заданными свойствами», «Повышение эксплуатационных характеристик деталей путем создания поверхностных слоев с прогнозируемыми свойствами», а также целой гаммой хозяйственных и государственных работ с Министерством промполитики, ГП ХМЗ ФЭД, ПО завод им. Малышева, НПО РОТОР, где проводилось внедрение этих результатов.

Исследования распределения плотности ионного тока по угловой координате в различных местах рабочего объема установки для плазменно-ионной обработки приведены только в двух работах [1, 2] да и исследовались далеко не самыми чувствительными при-

борами. Учитывая важность угловых распределений потоков ионов на деталь для определения производительности обработки в режиме нанесения покрытия, в режиме ионной очистки, в режиме ионной имплантации и ионного легирования, ионного полирования, все это говорит о важности и своевременности проводимого исследования.

### 2. Методика исследования угловых распределений плотности ионного тока в различных местах рабочего объема установки

Методика определения плотности тока была аналогична описанной в работе [3], с той лишь разницей, что датчики (цилиндры Фарадея) устанавливались под различными углами (-10, +10, 20, 30, 40°) по сравнению с падением ионов по нормали к поверхности, а блок датчиков перемещался шаговыми двигателями по радиусу. Фиксировались распределения при  $R = 0$  (ось установки),  $R = 20, 40, 60, 80$  и  $100$  мм.

### 3. Исследование угловых закономерностей распределения плотности ионного тока на подложку

Исследование проводилось с использованием того же автоматизированного комплекса, что в случае изучения характера полей распределения плотности ионного тока при падении частиц ионной составляющей плазменного потока на поверхность подложки под прямым углом.

На платформу 4 устройства перемещения датчиков (рис. 1, [3]) было смонтировано приспособление для размещения на ней шести цилиндров Фарадея под фиксированными углами - 10°, 0°, +10°, +20°, +30°, +40° относительно оси системы, совпадающей с центральной осью потока плазмы, излучаемого верхним источником. На рис. 1 изображена конструкция при-

способления с размещенными на ней под различными углами ориентации цилиндров Фарадея. Учитывая осесимметричный характер распыляемого потока ионов, движение платформы осуществлялось только в радикальном направлении и только по радиусу плоскости подложкодержателя от центральной оси системы к периферии.

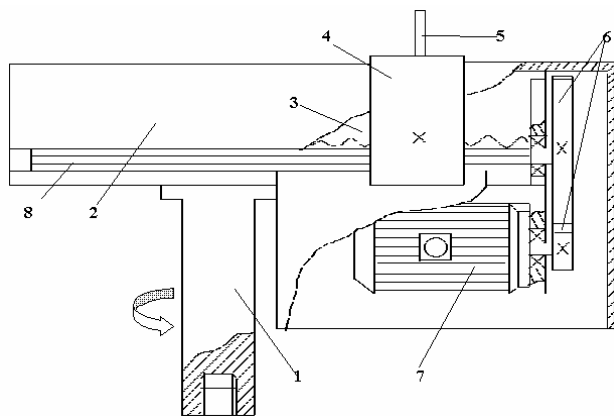


Рис. 1. Устройство для перемещения датчиков:

- 1—вал;
- 2—защитный кожух;
- 3—винт-гайка;
- 4—столик перемещающийся;
- 5—датчик;
- 6—шестерни;
- 7—шаговый двигатель;
- 8—основание

Направление перемещение выбиралось таким образом, чтобы в каждой опорной точке, где производились измерения, оси расположения положительно ориентированных датчиков примерно совпадали с траекториями разлета частиц потока ионов вблизи зоны взаимодействия потока с подложкой.

Измерение производилось в опорных точках, находящихся на радиусе плоскости подложки и отстоящие друг от друга на расстоянии 20 мм. Алгоритм работы измерительного автоматизированного комплекса был, примерно, таким же, как в случае измерения плотностей ионного тока и характера его распределения при использовании одного цилиндра Фарадея с той небольшой разницей, что в данном случае производился измерительной системой К 200/4 опрос шести датчиков с частотой переключения каналов 19 Гц и количеством измерений в одной опорной точке 100, а затем подавалась от системы компьютерного управления на перемещение платформы в соседнюю точку радиусной прямой.

Для исключения бокового подпыления торцов датчиков, а значит, и калиброванных отверстий потоком частиц на защитные экраны цилиндров Фарадея были одеты «зонтики» 7, представляющие собой цилиндры удлиняющие с наружной стороны экраны датчиков и не предотвращающие доступ параллельным по отношению к осям датчиков потоком плазмы в калиброванные отверстия.

Учитывая конструктивные особенности датчиков, можно утверждать, что на коллекторе 1 (зондовая трубка цилиндра Фарадея) наводился ток ионами, летящими, в основном, в направлении, совпадающем с осью ориентации датчика, т. е. с определенной долей приближения, зная углы ориентации датчиков, можно выявлять углы падения частиц (ионов) в различных точках поверхности.

При измерении интенсивности облучения поверхности ионным потоком, падающим под углом, пренебрегали характером распределения потока в зоне, ограниченной расположением верхних торцов датчиков плотности тока (она составляла 5 мм × 30 мм).

#### 4. Факторы, влияющие на угловые закономерности распределения падения ионов на подложку

Известно, что на движение ионов и большей степени электронов оказывается одновременное воздействие однородных электрических и магнитных полей, направленных под произвольным углом друг к другу.

В источнике плазмы с внешней магнитной фокусировкой плазменного потока степень влияния напряженности внешнего фокусирующего магнитного поля является определяющей в формировании диаграммы направленности и геометрических характеристик электронных и ионных пучков. Но нельзя не учитывать тот фактор, как влияние собственного магнитного поля разряда, приводящего к возникновению в плазме электрического поля [4]. Наличие этого компонента (электрическое поле) обуславливает фокусировку плазменного потока и снижение облучения подложки и углов разлета пучка. Особенно это влияние необходимо учитывать при 100 А и более [5].

По причине вышесказанного измерение интенсивности излучения поверхности частицами, летящими под разными углами проводились при дуге разряда

$I_d = 100$  А, напряжение на подложке  $U_n = 200$  В, давление рабочей среды  $P_c = 10^{-3}$  Па и при варьировании внешнего фокусирующего магнитного поля в пределах от  $H = 50$  э до  $H = 150$  э. Рабочая среда создавалась и автоматически поддерживалась за счет регулирования парциального давления реакционного газа – азота. Необходимо отметить, что при давлении ( $P = 10^{-2} + 10^{-3}$  мм.рт.ст.) и ниже претерпевает изменение пучок электронов. Проходящий в газе (при этом давлении), он может фокусироваться за счет действия пространственного заряда положительных ионов газа. При такой фокусировке электронный пучок принимает форму нити (нитевидный пучок) или нитки бус, либо промежуточную между этими двумя [5]. Таким образом, электронный пучок действует только в узкой зоне, совпадающей с центральной осью плазменного потока и не оказывает существенного влияния на формирование зондовой характеристики измерительных датчиков.

### 5. Результаты исследований

Измерения проводились в радиальных сечениях ионно-плазменного потока на расстоянии 470 мм и 330 мм от торца катода. Измерение напряженности магнитного поля от фокусирующего магнита было в пределах от  $H = 50$  э до  $H = 150$  э, что соответствовало изменению тока, протекающего через фокусирующую катушку от 0,2 до 0,6 А (пределы регулирования данного параметра на установке «Булат-6»).

На рис. 2, а, б, в, показаны распределения плотностей ионного тока по радиусам, измеренные с помощью датчиков, ориентированные под фиксированными углами  $\alpha_1 = -10$ ,  $\alpha_2 = 0$ ,  $\alpha_3 = +10$ ,  $\alpha_4 = +20$ ,  $\alpha_5 = +30$ ,  $\alpha_6 = 40$  по отношению к центральной оси ионного потока при удалении от торца катода источника плазмы на расстоянии 470 мм и изменении тока во внешней фокусирующей катушке от 0 до 0,6 А при  $I_d = 100$  А,  $U_n = 200$  В,  $P_c = 3 \cdot 10^{-3}$  Па.

Если проанализировать распределение плотности ионного тока измеренное датчиком, ориентированным под углом  $\alpha = 0$  (нормальное расположение датчика), то оно практически ничем не отличается от распределения плотностей ионного тока, полученное при измерении одним и девятью датчиками, располо-

женными на подложке, облученной верхним источником плазмы и показанное на рис. 2, а, б, в [3].

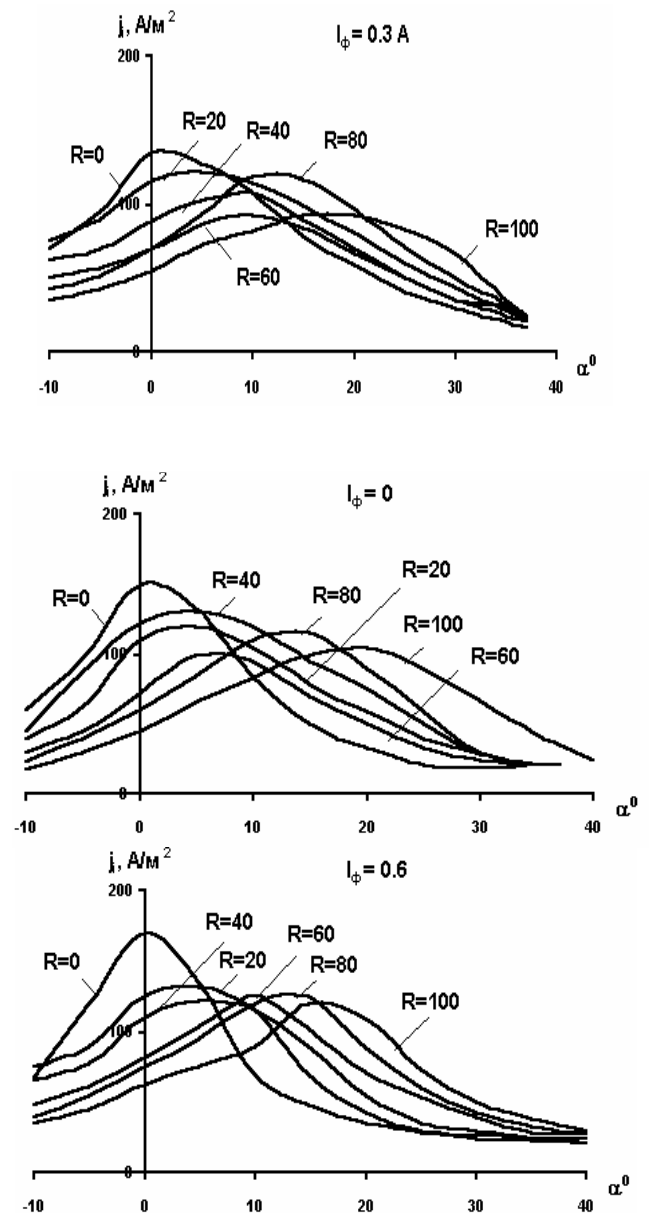


Рис. 2. Распределение плотности тока по угловой координате при работе одного испарителя и различных токах фокусирующего магнита при различных состояниях от оси испарителя:

- а)  $I_\phi = 0.3$  А;
  - б)  $I_\phi = 0$ ;
  - в)  $I_\phi = 0.6$  А.
- ( $L = 470$ ,  $I_g = 100$  А,  $P_{cp} = 3 \cdot 10^{-3}$  мм рт. ст.)

Наиболее облученный – коллектор датчика, расположенный углом  $\alpha_3 = \pm 10^\circ$ . Диапазон изменения значений плотностей ионного потока, измеренный датчиком под углом  $\alpha_3 = \pm 10^\circ$ , находится в пределах от  $85 A/m^2$  до  $120 A/m^2$  при  $I_{\phi m} = 0.6$  А и от  $70 A/m^2$  до  $130 A/m^2$  при  $I_{\phi m} = 0,2$ .

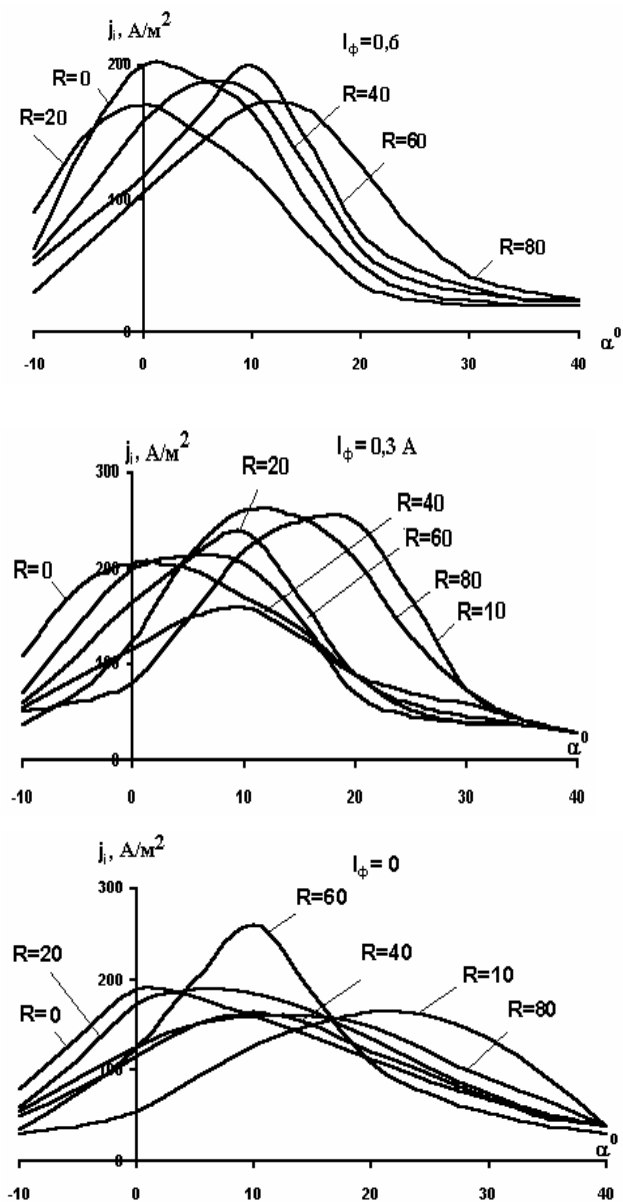


Рис. 3. Распределение плотности тока по угловой координате на различных расстояниях от оси испарителя и при различных токах фокусировки:

- а) - 0.6 А;
- б) - 0.3 А;
- в) - 0 А.

( $I_g = 100$  А,  $U_{\text{подл}} = 200$  В,  $P = 3 \cdot 10^{-3}$  мм рт. ст.,  $L = 330$  мм)

Максимум облучения датчика приходится на тот момент, когда платформа с датчиками удалена от оси потока на расстояние 60 мм при  $I_{\text{cp}} = 0.6$  А и  $I_{\text{cp}} = 0$ . Но при  $I_{\text{cp}} = 0.3$  А максимум облучения наступает при удалении на 80 мм от центра оси ионного потока. На периферии подложки ( $R = 100$  мм) значения плотностей тока при разных значениях фокусирующего магнитного поля, примерно, одинаковы и равны  $(100 - 110)$  А/м<sup>2</sup>. необходимо отметить плавность изменение значений плотностей от точки к точке, что

наглядно демонстрирует характер кривой  $J = F(R)_{\alpha=+10^0}$  (рис. 2, а).

Если перейти к зависимости  $J = f(\alpha)$  для различных режимов работы установки при измерении плотности потока на расстоянии от катода 470 мм (рис. 3, а, б, в), то и эти зависимости наглядно демонстрируют тот факт, что при  $\alpha = 10+15^0$ , наибольшие значения плотностей тока наблюдается на расстоянии 60 + 70 мм от центра потока, причем эта тенденция сохраняется практически для всех режимов работы технологического оборудования.

Если проанализировать облучаемость датчика, ориентированного под углом  $\alpha = +20^0$ , то характерной особенностью, практически во всех режимах, будет то, что в центре подложки этот датчик практически облучается очень слабо (плотность соответствует, примерно, значениям, равным 20 – 35 А/м<sup>2</sup> при  $J_{\phi} = 0$  до 0.6 А). По мере продвижения датчика к периферии датчик начинает улавливать ионный поток. Так, например, при токе фокусировки 0.6 А распределение плотности ионного тока, измеренное этим датчиком, напоминает показательную функцию, где значение  $J$  в точке  $R = 100$  мм возрастает до 110 – 113 А/м<sup>2</sup>. При токе через фокусирующую систему  $I_{\text{cp}} = 0.3$  А кривая распределения для датчика, ориентированного под углом  $\alpha = 20^0$ , приближается к прямой и значения  $J$  возрастают по линейному закону с 25 А/м<sup>2</sup>. при  $R = 0$  до 100 А/м<sup>2</sup>. при  $R = 100$  мм. По мере удаления платформы с датчиком от центральной оси.

Что же касается характера данной кривой распределения плотности тока (для  $\alpha = +20^0$ ,  $I_{\text{cp}} = 0$ ), то в этом случае по мере увеличения расстояния по радиусу от 0 до 60 мм плотности увеличиваются от 30 до 70 А/м<sup>2</sup>, а затем наблюдается спад до 60 А/м<sup>2</sup> при  $R = 100$  мм.

Если провести анализ зависимостей при различных значениях внешнего фокусирующего магнитного поля по кривым  $J = f(\alpha)$  (рис. 4, а, б, в) при  $\alpha = +20^0$  и  $I_{\text{cp}} = 0$ , то в этом случае наглядно видно, что большие значения плотностей находятся на кривой плотностей ионного тока при  $R = 100$  мм, меньше при  $R = 80$  мм, еще меньше при  $R = 60$  мм и т.д. Не нарушается эта иерархия и при значении фокусирующего магнитного поля при токе в фокусирующей обмотке 0.3 А. Если

же анализировать значения плотности тока при  $\alpha = 20^\circ$  и  $I_{cp} = 0$ , то в этом случае наглядно видно, что большие значения принадлежат кривой плотности ионного тока для  $R = 80$  мм, меньше – для  $R = 100, 60, 40$  мм и т.д. Что касается степени облучения коллекторов датчиков, ориентированный под углом  $\alpha = +30^\circ, \alpha = +40^\circ, \alpha = -10^\circ$ , то она явно ниже, нежели  $\alpha = 0^\circ, \alpha = +20^\circ, \alpha = +20^\circ$ .

Датчик, ориентированный под углом  $\alpha = +40^\circ$ , вообще, практически, не облучается основным потоком, а улавливает частицы, хаотично движущиеся в ускоренной плазме за счет столкновительных процессов, упругих соударений и отражений от стенок вакуумной камеры. Этот фон отраженных частиц лежит в пределах от  $(10 - 20) \text{ A/m}^2$  практически при любых режимах работы ионно-плазменной установки.

При рассмотрении зависимостей  $J = F(R), J = F(\alpha)$   $\alpha = -10^\circ$  (отрицательно ориентированный датчик по отношению к оси потока) можно отметить общий характер облучения при любых режимах напыления. Наиболее интенсивно датчик облучается в центре (при  $R = 0$ ) и по мере удаления платформы с датчиками от центра значения плотности, убывают от  $50 \text{ A/m}^2$  ( $R = 0$ ) до  $20 \text{ A/m}^2$  при  $R = 100$  см. При угле ориентации  $\alpha = +30^\circ$  наблюдается обратная зависимость, т.е. максимум облучения наблюдается тогда, когда платформа с датчиком расположена в точке  $R = 100$  см и достигает здесь значений плотности тока практически для всех режимов  $J = (30-35) \text{ A/m}^2$ . На рис. 4, а, б, в наглядно продемонстрировано слабое облучение цилиндров Фарадея, расположенных под углом  $\alpha = +30^\circ$  и тем более под углом  $\alpha = +40^\circ$ . где проведено исследование интенсивности облучения разноориентированных датчиков расположенных на расстоянии 330 мм от торца катода.

Результаты исследований показывают, что значения плотностей ионного потока, измеренные датчиками, удаленными на расстояние  $L = 330$  мм от катода, возросли примерно в два раза, за исключением значений, измеряемых датчиками, ориентированными под углом  $\alpha = +30^\circ$  и в большей степени под углом  $\alpha = +40^\circ$  и  $\alpha = -10^\circ$ . Это значение не относится к режиму, когда отсутствует фокусирующее внешнее магнитное поле

( $I_{cp} = 0$ ). При этом наблюдается явное увеличение облучаемости датчика под углом  $\alpha = +30^\circ$  и при удалении его от центра на расстояние  $R = 80$  мм (рис. 4).

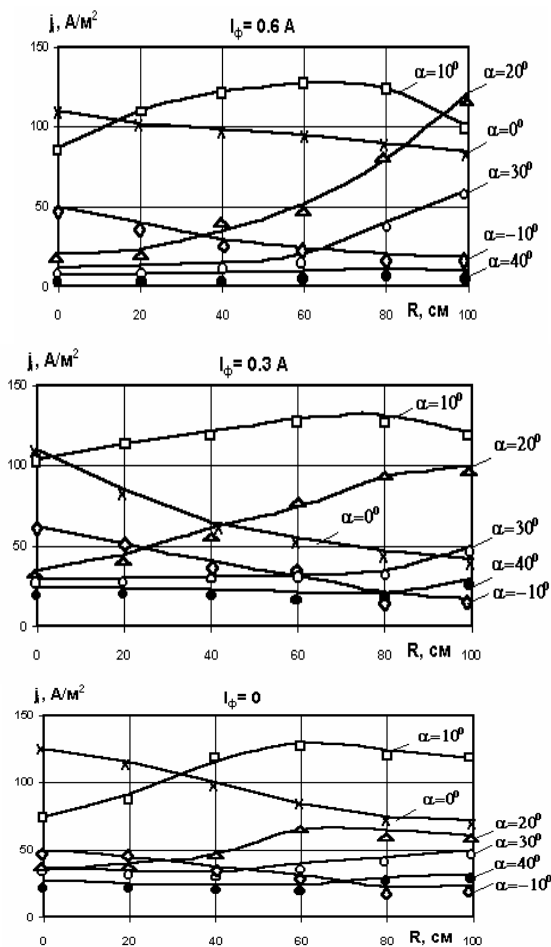


Рис. 4. Распределение плотности тока по радиусу при различных токах на фокусирующем магните:

а)  $I_\phi = 0.6 \text{ A}$ ;

б)  $I_\phi = 0.3 \text{ A}$ ;

в)  $I_\phi = 0$ ;

( $L = 470 \text{ мм}, I_g = 100 \text{ A}, U_{под} = 200 \text{ В}, P = 3 \cdot 10^{-3} \text{ мм рт. ст.}$ )

Наиболее интенсивно облучается при  $I_{cp} = 0$  датчик под углом  $\alpha = +10^\circ$ , удаленный на  $R = 60$  мм от центра. Необходимо отметить, что интенсивность облучения датчика, ориентированного под углом  $\alpha = +10^\circ$ , самая высокая, как и в случае расположения платформы с датчиками на уровне  $L = 470$  мм от катода. Интенсивность облучения датчика под  $\alpha = +10^\circ$  достигает тех значений, когда плотность потока равна  $250 \text{ A/m}^2$  при  $R = 40$  мм и по мере удаления от центра на  $R = 100$  см уменьшается до  $150 \text{ A/m}^2$ .

Что касается облучения датчика, расположенного под углом  $\alpha = +20^\circ$  к оси потока, то здесь наблюдается обратная картина. При переходе из  $R = 0$  в точку

R = 50мм значения плотностей тока не изменяются, а потом, по мере продвижения платформы с датчиками к периферии, наблюдается резкий подъем степени облучения, когда плотность потока возрастает до 250 А/м<sup>2</sup> (при R =100 см). Необходимо отметить тот факт, что при L = 330 мм от катода, на зависимостях J = F(α) (рис. 4, а, б, в) максимум значений плотности ионного тока смещаются, хоть и незначительно, влево в сторону уменьшения углов. Это свидетельствует о том, что на удалении 330 мм от катода ионно-плазменный поток более сфокусирован, и что углы разлета плазменного пучка меньше.

Анализируя зависимости J = F(α) (рис. 1, [7]), можно, при различных значениях внешнего фокусирующего магнитного потока в различных точках и уровнях, определить, примерно, вероятностные значения углов падения частицы ионной составляющей плазменного потока в различных точках прямой по радиусу (а значит, и на поверхности подложки).

Вероятностные значения углов падения при различных значениях магнитного фокусирующего поля в различных точках прямой по радиусу при плоскости подложки, расположенной на расстоянии L=330 мм и L = 470 мм от катода верхнего источника плазмы сведены в табл. 1.

Таблица 1

		Угол падения ионов (α <sup>0</sup> )					
		L=330 мм			L=470мм		
Rмм	I <sub>ср</sub> (А)	0	0.3	0.6	0	0.3	0.6
		0		α=0 <sup>0</sup>	α=0 <sup>0</sup>	α=0 <sup>0</sup>	α=(0-1.5) <sup>0</sup>
20		α=(4-5) <sup>0</sup>	α=(1-2) <sup>0</sup>	α=(1-2) <sup>0</sup>	α=(3-5) <sup>0</sup>	α=4 <sup>0</sup>	α=(3-4) <sup>0</sup>
40		α=6 <sup>0</sup>	α=4 <sup>0</sup>	α=3 <sup>0</sup>	α=(6-8) <sup>0</sup>	α=(8-9) <sup>0</sup>	α=(5-5.5) <sup>0</sup>
60		α=10 <sup>0</sup>	α=8 <sup>0</sup>	α=8 <sup>0</sup>	α=(11-11.5) <sup>0</sup>	α=(10-11) <sup>0</sup>	α=10 <sup>0</sup>
80		α=14 <sup>0</sup>	α=(11-12) <sup>0</sup>	α=(11-12) <sup>0</sup>	α=(15-16) <sup>0</sup>	α=(13-14) <sup>0</sup>	α=(12-12.5) <sup>0</sup>
100		α=15 <sup>0</sup>	α=14 <sup>0</sup>	α=13.5 <sup>0</sup>	α=(18-19) <sup>0</sup>	α=(16-17) <sup>0</sup>	α=15 <sup>0</sup>

### Выводы.

1. Углы падения частиц ионного потока, при которых реализуется максимальная плотность тока, (излучаемого верхним источником плазмы) отстоящим от облучаемой поверхности на расстояниях L = 330 мм и L = 480 мм, находятся в диапазоне от α=0° α = 20°.

2. При варьировании значения напряженности внешнего магнитного фокусирующего поля в диапазоне H = 50 э до H = 150 э (что соответствует I<sub>ср</sub> = 0,2 до I<sub>ср</sub> = 0,6), изменение угла разлета ионного потока незначительно, находится в пределах 1,5 – при L = 330 мм и 3 – 4<sup>0</sup> при L = 470 мм.

3. Зная углы разлета (или схождения) траекторий ионов и периметры облучаемых сечений на различных радиусах, можно представить диаграмму направленности и геометрию пучка ионного потока.

### Литература

1. Плазменное напыление при производстве авиационной техники и инструмента / Г.И. Костюк, И.И. Аксенов, В.Г. Приезжев, В.М. Хороших, А.С. Цыбин: Уч. пособие.- Харьков: ХАИ, 1988.- 103 с.
2. Костюк Г.И. Физико-технические основы нанесения покрытий, ионной имплантации и ионного легирования, лазерной обработки и управления, комбинированных технологий.– Харьков: Изд-во АИНУ, 2002.- 130 с.
3. Патлай Н.И. Низкотемпературное нанесение покрытий на детали двигателей и агрегатов летательных аппаратов в вакуумной технологической установке с радиальными потоками плазмы: Дис... канд. техн. наук.- Харьков, 1991.– 221 с.

Поступила в редакцию 06.07.03

**Рецензенты:** д-р техн. наук, профессор Ю.В. Тимофеев, НТУ «ХПИ», г. Харьков; д-р техн. наук, профессор А.И. Долматов, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», г. Харьков.