



УДК 669.187.58

## ВИХРЕВОЙ ЭФФЕКТ И ГАЗОДИНАМИКА В ПОЛОМ ЭЛЕКТРОДЕ ПЛАЗМОТРОНА

К.А. Цыкуленко, В.А. Шаповалов, В.В. Степаненко, Д.М. Жиров

Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины.  
03680, г. Киев, ул. Боженко 11. E-mail: office@paton.kiev.ua.

Работа направлена на изучение основных газодинамических характеристик плазмотрона с полым катодом, что, в конечном итоге, должно привести к созданию высокоресурсного металлургического плазмотрона. Показана взаимосвязь вихревого эффекта и газодинамики полого электрода плазмотрона. Дано описание физической модели плазмотрона с полым электродом для исследования распределения в нем газовых потоков. Показано, что на выходе из завихрителя пристеночный поток представляет собой несколько отдельных спирально закрученных жгутов, направленных как в электрод, так и в сопло. В результате в центральной части полости формируется область пониженного давления. Определено изменение давления пристеночного вихревого потока на стенку полого электрода по мере удаления этого потока от камеры завихрителя в зависимости от глубины полости электрода и давления газа, подаваемого в камеру завихрителя. Исследовано распределение давления выходящего потока газа по сечению сопла модели плазмотрона. На основании анализа литературных данных и собственных предварительных экспериментов предложена гипотетическая схема движения потоков газа в плазмотроне с полым электродом. Библиогр. 13, ил. 7.

**Ключевые слова:** ресурс работы плазмотрона; полый электрод; вихревой эффект; модель плазмотрона; давление потока газа; область пониженного давления; схема движения газовых потоков

Газодинамические характеристики плазмотрона с полым электродом (чаще всего катодом) определяют надежность его работы и существенно влияют на срок службы. Повышение ресурса работы плазмотронов, особенно металлургических с токовой нагрузкой 1...10 кА, продолжает оставаться актуальной задачей [1, 2]. Эта работа посвящена изучению указанных характеристик.

Ресурс работы полого электрода плазмотрона определяется износом его внутренней поверхности, который в свою очередь (при прочих равных условиях) зависит от площади подвергаемой износу поверхности и тепловых условий работы. Привязка дуги может быть диффузной и контрагированной. С целью повышения ресурса работы, особенно с учетом относительно небольшой толщины стенки полого электрода, целесообразно обеспечить привязку дуги к ней в диффузном виде, что представляет основную задачу специалистов, работающих над созданием новых конструкций высокоресурсных металлургических плазмотронов [1, 2]. Пока еще нет четких критериев, позволяющих предвидеть тип привязки дуги. В числе влияющих факторов называются форма, материал и интенсивность охлаждения электрода; значение и плотность тока; состав и давление плазмообразующего газа; характер распределения и скорость газовых потоков, обуславливающих образование локальных зон пониженного давления, в которых может образовываться

ся объемный разряд [1–8]. В случае формирования контрагированной привязки перемещением пятна дуги по внутренней поверхности полого электрода можно целенаправленно управлять с помощью различно направленных, в том числе вихревых, газовых потоков. При быстром перемещении пятна дуги уменьшается тепловая нагрузка и, следовательно, износ внутренней поверхности электрода [1, 9]. Кроме того, с помощью газовых потоков можно создавать дополнительное (наряду с водяным) охлаждение стенки электрода [1, 10].

Изучение характера распределения и динамики вихревых газовых потоков в полем электроде такого плазмотрона по существу является исследованием вихревых потоков в трубках Ранка–Хилша. При движении вихревого потока газа по внутренней поверхности трубки (полого электрода) у стенки образуется область повышенных, а в центре полости — область пониженных значений температуры и давления [11, 12].

Вихревой эффект несмотря на довольно продолжительный срок исследований до сих пор не имеет научного объяснения. Несмотря на это создаются различные конструкции и аппараты, основанные на вихревом эффекте. Применительно к устройствам для плазменной техники в высокочастотных плазмотронах используются газовихревая изоляция стенки камеры и стабилизация плазмы на оси, разработаны конструкции дуговых плазмотро-

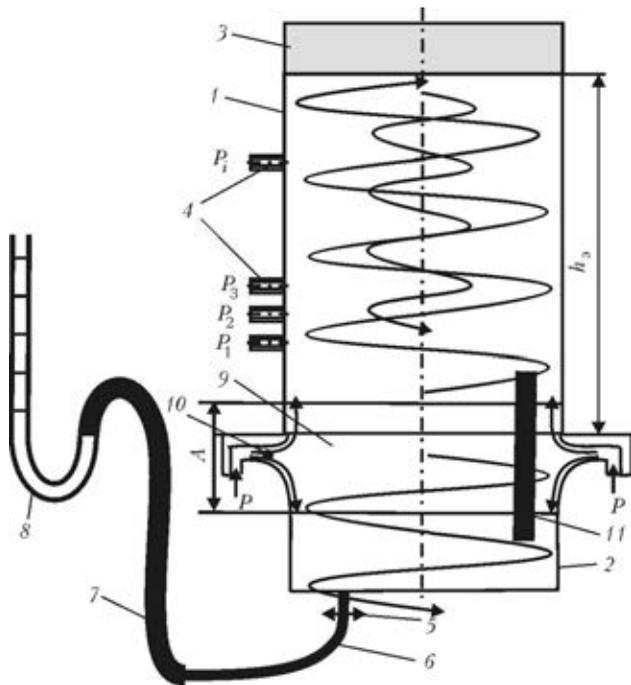


Рис. 1. Схема модели плазматрона и измерения давления в ней: 1 – полый электрод; 2 – сопло; 3 – поршень; 4 – датчики пристеночного давления; 5 – направление перемещения измерительной трубки; 6 – измерительная трубка; 7 – вакуумный шланг; 8 – водяной манометр; 9 – область пониженного давления; 10 – затягивание компактных предметов; 11 – вращение легких длинномерных предметов;  $P_1...P_4$  – давление у стенки

нов с полым катодом и различные способы вихревой подачи газа [1, 9, 10, 13], однако ресурс работы дуговых плазматронов, предназначенных для плавки металлов, все еще недостаточно высок.

Рассматривая множество существующих теорий, объясняющих эффект Ранка–Хилша [11, 12], можно заключить следующее. В настоящее время уже никто не подвергает сомнению (как это было при его открытии) существование самого эффекта, состоящего в разделении подаваемого потока газа на периферийную (горячую) и центральную (холодную) закрученные спирали. Однако некоторые исследователи отмечают, что вращение центрального и периферийного потоков, происходит в одну и ту же сторону, другие – в разные стороны, что, по-видимому, связано с условиями проведения экспериментов (скоростью подачи газа в трубку, геометрическими размерами и профилем самой трубки, степенью дросселирования и пр.).

Применительно к работе дугового плазматрона отметим, что основное отличие газодинамики плазматрона с полым электродом и вихревой трубки Ранка–Хилша состоит в том, что в дуговом плазматроне имеется только один канал для выхода газов – сопло. Если в процессе закрутки и происходит разделение потоков газа, то при выходе из сопла эти потоки должны каким-то образом смешиваться. Кроме того, само сопло можно рассматривать как вторую (хотя и более короткую) трубку Ранка–Хилша, установленную в обратном направлении к первой трубке (полуму электроду). Подключение такого плазматрона к источнику питания и создание

плазменно-дугового разряда еще больше усложняет картину течения газовых потоков.

С учетом приведенных соображений для разработки высокоресурсного металлургического плазматрона с полым электродом необходимо определить распределение газовых потоков и его газодинамические характеристики. Представляет интерес изучение возможности управления перемещением пятна привязки дуги по внутренней поверхности полого электрода, а также создания условий для формирования диффузионного типа привязки.

Определенные исследования в этом направлении проведены в Новосибирском институте теоретической и прикладной механики СО РАН [1, 9], которые, однако, содержали довольно много неясностей и противоречий.

В Институте электросварки им. Е.О. Патона для изучения распределения газовых потоков в полум электроде плазматрона были проведены собственные исследования. Для них изготовили модель плазматрона, где с целью имитации различной длины полого электрода предусмотрено перемещение специального поршня (рис. 1).

В завихритель газ (сжатый воздух) поступает по двум диаметрально расположенным патрубкам при одинаковом давлении в каждом (рис. 2, а). Из завихрителя в камеру (в полость электрода и сопло) газ подается через восемь тангенциально направленных каналов диаметром 3 мм. Расход газа и общая площадь входных отверстий в вихревой камере влияют на протяженность первой циркуляционной зоны. В плазматронах с полым катодом, в отличие от трубок Ранка–Хилша, как правило, предусмотрена подача газа не через один, а через несколько тангенциальных каналов для более равномерного распределения пристеночного потока. Однако простое увеличение количества каналов в завихрителе не может обеспечивать равномерное распределение этого потока на внутренней поверхности полого электрода плазматрона.

На выходе из завихрителя пристеночный поток, по всей видимости, представляет собой несколько (в соответствии с количеством тангенциальных каналов) отдельных спирально закрученных жгутов. Скорость потока в каждом из них определяется при всех прочих равных условиях давлением газа на выходе из канала. На рис. 2 представлена схемы движения потоков в используемом завихрителе и диаграмма давлений в направляющем кольцевом зазоре напорного коллектора. Применение завихрителя подобной конструкции предполагало обеспечение равномерного распределения подаваемого потока газа по внутренней поверхности полого электрода. Однако, как показали эксперименты, даже при давлении подаваемого газа до  $P_0 = 4,9 \cdot 10^5$  Па в направляющем кольцевом зазоре зафиксирована некоторая неравномерность вихревого потока, вызванная двумя факторами – существованием отдельных вихревых жгутов и возможной разницей значений давления в них.

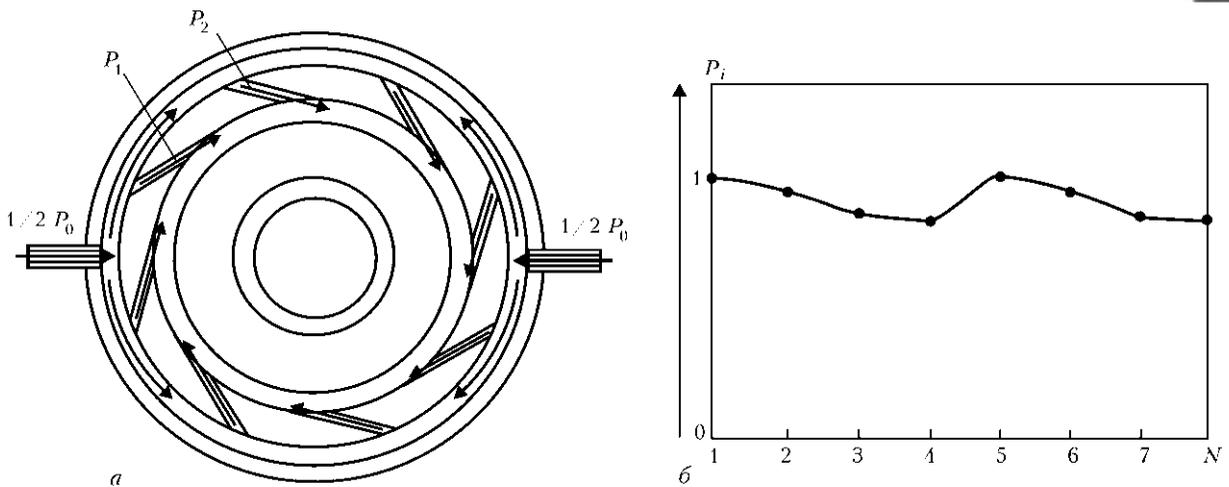


Рис. 2. Схема потоков газа в завихрителе (а) и диаграмма давлений в направляющем кольцевом зазоре напорного коллектора (б);  $N$  — номера каналов

Наличие вихревых жгутов обусловлено способом подачи газа через отдельные тангенциальные каналы. Теоретически такие жгуты будут существовать до тех пор, пока по мере продвижения пристеночного вихревого потока вдоль оси полого электрода, снижения давления и расширения диаметра самого жгута они не сольются в один поток равной плотности. Чем меньше диаметр тангенциального канала завихрителя, а также меньшее количество таких каналов и большее расстояние между ними, тем позже при прочих равных условиях сформируется равномерный пристеночный поток. Разница значений давления газа в отдельных жгутах обусловлена расположением того или иного тангенциального канала относительно внешних подводящих газ патрубков. Как правило, вихревая камера плазмотрона имеет один или два таких патрубка. В условиях эксперимента чем ближе к внешнему патрубку располагали тангенциальный канал завихрителя, тем выше поднималось давление в нем. Причем при одинаковом расстоянии от внешнего патрубка давление выше в сонаправленном с потоком канале. Возможно, при более высоком давлении подаваемого газа, когда потери давления в кольцевом зазоре за счет расхода через тангенциальные каналы будут незначительны, удастся обеспечить более равномерное распределение потоков газа и добиться примерно равных значений давления в каждом жгуте.

При выходе из кольцевого зазора напорного коллектора завихрителя происходит разделение газового потока. Одна часть формирует пристеночный вихревой поток в полном электроде диаметром 45 мм ( $d_2$ ), другая — в сопле диаметром 41 мм ( $d_1$ ). Оба этих вихревых потока из-за высоких скоростей вращения создают в центральной части полости разрежение и формируют общую область пониженного давления (рис. 1). Именно существование этой области может обеспечить диффузную привязку дуги к электроду, что повысит ресурс работы плазмотрона.

Небольшие легкие и компактные предметы (клячки бумаги, щепки), размещенные на оси моде-

ли плазмотрона, в области выхода и разделения газовых потоков под действием центробежных сил мгновенно затягиваются в щелевой зазор. Если эти предметы разместить на оси, но вне этой области (в условиях эксперимента протяженность указанной области по оси модели плазмотрона составила 15...20 мм), то они смещались к стенке и уносились соответствующим вихревым потоком (в сопло или полость электрода). Длинномерные легкие предметы, например карандаш, размещенные на оси модели таким образом, что их центр тяжести расположен в области А (рис. 1), под действием разнонаправленных вихревых потоков закручиваются внутри модели и вращаются вокруг оси у стенок полого электрода и сопла. Если центр тяжести такого предмета выходит за пределы указанной области, то предмет подхватывается и перемещается соответствующим потоком. Регулируя давление подаваемого газа, можно управлять положением (высотой расположения) предмета в полости электрода. Чтобы оценить уровень подъемной силы вихревого пристеночного потока, в полость электрода вместо запирающего торца поршня помещали шайбу из оргстекла, которая под воздействием потока газа могла свободно перемещаться внутри. При давлении газа на входе в завихритель  $3,2 \cdot 10^5$  Па вихревой поток, направленный в полость электрода, удерживал шайбу с установленной на ней гирькой, общая масса которых составила 185 г, у верхнего торца полого электрода на высоте  $h = 420$  мм.

Пристеночный вихревой поток, направленный в полость электрода, стремясь под действием центробежных сил расширяться, оказывает давление на его стенку. Для оценки его значения по всей высоте полого электрода установили датчики давления. Изменение давления пристеночного вихревого потока на стенку полого электрода по мере удаления этого потока от камеры завихрителя определяли в зависимости от глубины полости электрода (рис. 3).

При небольшой глубине полости электрода  $h_3$ , примерно  $0,5d_2$ , изменение уровня пристеночного

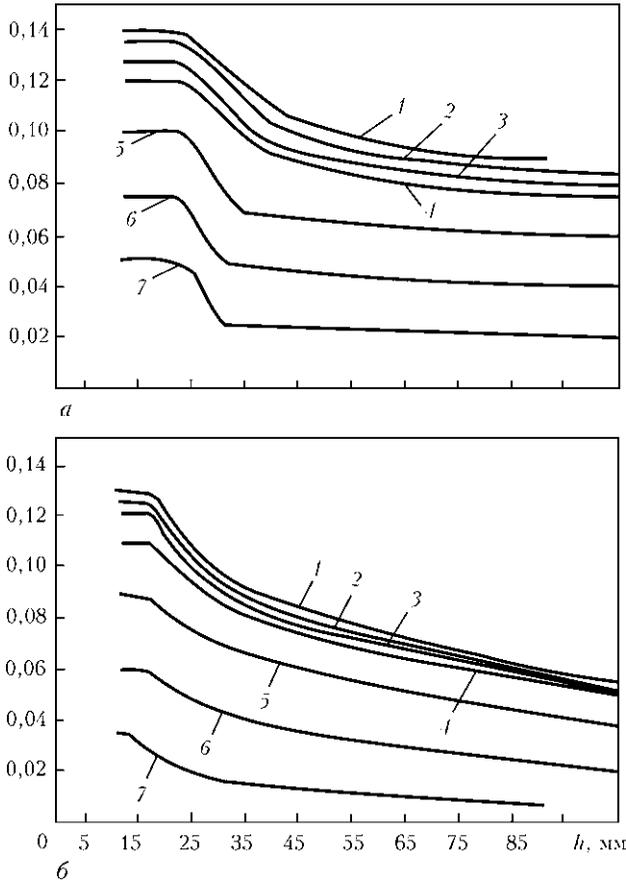


Рис. 3. Изменение давления пристеночного вихревого потока в зависимости давления газа, подаваемого в камеру завихрителя, и удаления от камеры завихрителя (глубина полости электрода  $h_s$  равна 108 (а) и 390 мм (б) при  $P_0 \cdot 10^5$ , Па: 1 – 4,9; 2 – 4,8; 3 – 4,6; 4 – 4,4; 5 – 3,85; 6 – 3,0; 7 – 2,0

давления не зафиксировано. В случае увеличения глубины полости электрода до  $2d_2$  и более по мере продвижения вихревого потока к торцу электрода отмечено снижение давления потока на стенку. Причем наиболее резкое изменение давления в условиях эксперимента происходило на высоте 20...30 мм. Можно предположить, что профиль указанных зна-

чений давления в какой-то мере отражает профиль зоны разряжения в осевой полости электрода.

Учитывая, что в полости электрода, как и в трубке Ранка–Хилша, возможно разделение вихря на горячий и холодный потоки, с помощью пирометра замеряли температуру поверхности стального электрода, которая перед продувкой по показаниям пирометра составляла 18 °С, а подаваемого в завихритель газа – 19...20 °С. На рис. 4 представлены результаты замеров температуры различных участков наружной поверхности полого стального электрода (толщина стенки 1,5 мм) в зависимости от давления газа, подаваемого в завихритель и времени продувки.

Полученные данные свидетельствуют о том, что пристеночный вихревой поток по мере его продвижения к торцу полого электрода ослабевает, уровень оказываемого давления на стенку снижается. Потеря энергии потоком объясняется потерями на трение о стенку полого электрода, а также снижением плотности потока за счет расширения газа и резким сокращением (или вообще исчезновением) области пониженного давления. Чем выше давление подаваемого в завихритель газа, тем больше давление вихревого пристеночного потока на стенку электрода, температура поверхности электрода увеличивается. Сопоставляя графики давления и температуры (рис. 3, 4) отметим, что температура поверхности электрода возрастает не только из-за повышения времени продувки, но и по мере продвижения пристеночного вихревого потока к его торцу. Снижение давления потока на стенку должно бы приводить к уменьшению сил трения и, следовательно, к снижению температуры поверхности. Конечно, в процессе совместного трения нагреваются оба тела (поверхность электрода и газ пристеночного вихревого потока). Однако такое заметное повышение температуры поверхности по мере продвижения потока к торцу электрода вряд ли можно объяснить только одним ростом температуры самого пристеночного потока.

Снижение температуры поверхности у торца электрода (на расстоянии 350 мм от среза сопла) объясняется влиянием массивного стального поршня, контактирующего с тонкой стенкой электрода и выполняющего в данном случае роль холодильника.

Пока нет единого мнения о том, каким образом формируется возвратный поток. Одним из вариантов является отражение пристеночного потока от торцевой поверхности полости электрода (этот механизм вероятен при сравнительно небольшой глубине полости электрода), другим – возникновение осевого градиента давления (этот механизм возможен при большой глубине полости электрода). По всей видимости, в общем случае имеется совместное влияние обоих этих факторов, степень которого определяется давлением подаваемого газа и геометрическими размерами полости электрода.

Практически все исследователи вихревого эффекта в трубках Ранка–Хилша изображают воз-

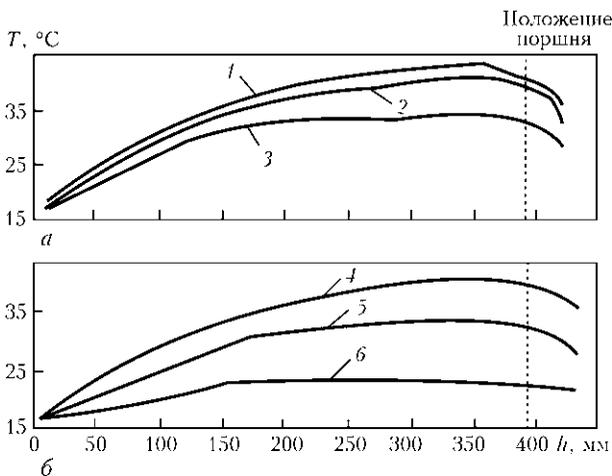


Рис. 4. Изменение температуры полого электрода при подаваемом давлении  $4,8 \cdot 10^5$  Па и времени продувки 420 (1); 180 (2); 60 с (3) (а); при времени продувки 180 с и подаваемом давлении  $4,8 \cdot 10^5$  (4);  $3,85 \cdot 10^5$  (5);  $2,0 \cdot 10^5$  Па (6) (б)



вратный поток, как вихревой осевой [11, 12]. При исследовании газодинамики плазмотронов с полым катодом возвратный поток также является осевым [1, 9], однако не ясен его характер — прямооточный или вихревой. При анализе схемы распределения газовых потоков в полым катодом плазмотрона возникает вопрос, что происходит с возвратным осевым потоком, когда он проходит сквозь область пониженного давления.

В общем случае пониженное давление должно способствовать расширению этого потока и его распределению по всему сечению электрода. Однако следует учитывать следующее. Область пониженного давления не равномерна, формируется под действием центробежных сил вихревого пристеночного потока, а максимальное разрежение достигается на оси плазмотрона. Если возвратный поток сформировался под воздействием осевого градиента давления и имеет прямооточный характер, то именно туда должен быть направлен возвратный поток газа. Если принять, что осевой возвратный поток имеет вихревой характер движения, то как и в случае пристеночного потока центробежные силы должны растягивать его к стенкам электрода. Другими словами, возвратный поток должен иметь форму не цилиндра, расположенного на оси плазмотрона, а конуса.

Для оценки расположения возвратного потока проведено исследование распределения давления выходящего потока газа по сечению сопла модели плазмотрона. Измеряли давление на локальных участках с помощью водяного манометра в радиальном направлении непосредственно у среза сопла. На рис. 1 представлена схема измерений, а на рис. 5 — график значений давления в относительных единицах (по положению водяного столба в манометре). Внутренний диаметр трубки, используемой для замеров локального давления, составлял 2 мм.

Из полученных данных следует, что при холодных продувках весь поток выходящего из сопла плазмотрона газа сосредоточен у стенки сопла. Толщина пристеночного слоя газа составляла всего несколько миллиметров. Во всей остальной области зафиксировано разрежение. Возвратного осевого потока (т. е. потока газа, идущего из полости электрода) на выходе из сопла не обнаружено. При небольшом давлении подаваемого в завихритель газа во всей центральной области сопла фиксировали примерно одинаковое разрежение. Только при  $3 \cdot 10^5$  Па удалось обнаружить в осевой области некоторое снижение уровня разрежения.

Отсутствие осевого потока, выходящего из сопла плазмотрона, объясняется тем, что сопло также представляет собой трубку Ранка-Хилша, установленную в обратном направлении к полуму электроду. Как и в полости электрода, в сопле из части газа, поступающего из завихрителя, формируется пристеночный вихревой поток (рис. 6), который создает разрежение в центральной части сопла и

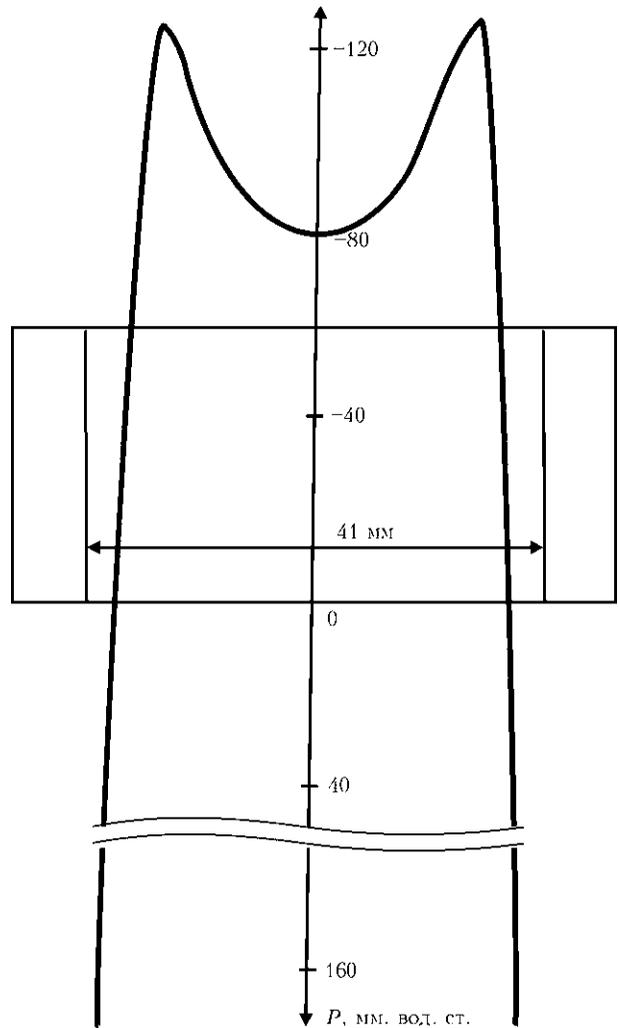


Рис. 5. Эпюра значений давления потоков газа на выходе из сопла модели плазмотрона с полым электродом

способствует образованию встречного возвратного потока газа, втягиваемого в сопло из окружающей атмосферы. Зафиксированное в осевой области некоторое снижение уровня разрежения объясняется влиянием возвратного потока газа, поступающего из полости электрода. Для оценки взаимодействия двух встречных возвратных потоков необходимо провести более тщательные исследования распре-

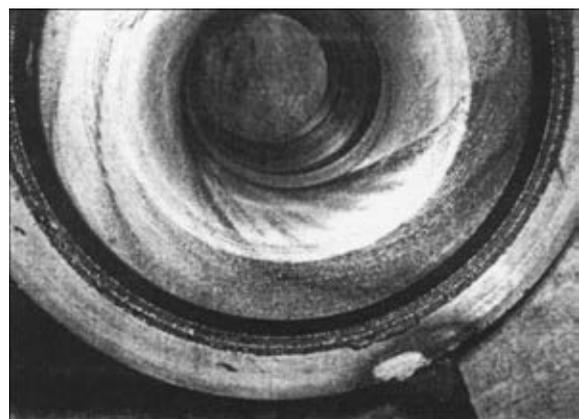


Рис. 6. След от вихревого пристеночного потока, оставленный влажным загрязненным воздухом на выходе из направляющего кольцевого зазора напорного коллектора и в сопле модели плазмотрона

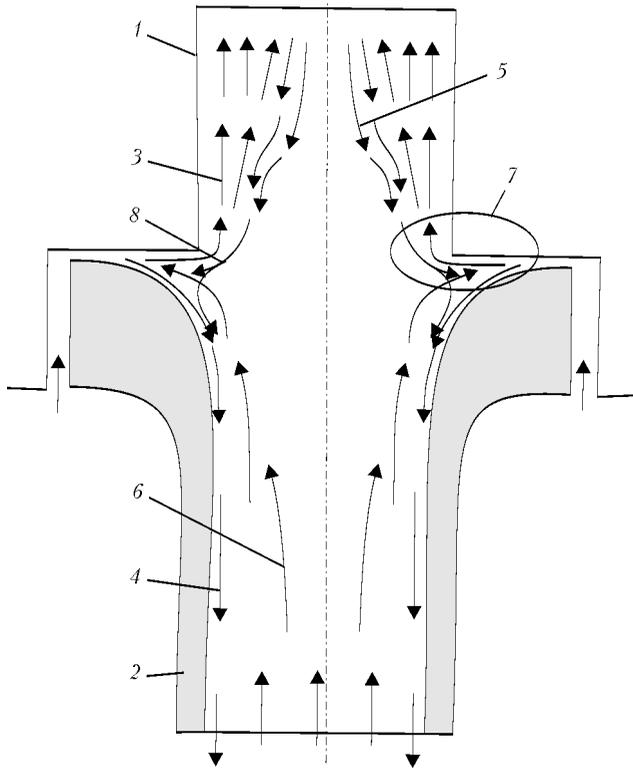


Рис. 7. Гипотетическая схема распределения газовых потоков в плазматроне с полым электродом: 1 — полый электрод; 2 — сопло; 3, 4 — пристеночные (соответственно в электрод и сопло); 5, 6 — возвратные (соответственно электрода и сопла); 7 — область пересечения встречных потоков; 8 — смешение потоков

деления давления по сечению на уровне камеры завихрителя и полости электрода.

В целом на данном этапе работ схема распределения газовых потоков в плазматроне с полым электродом в общем случае может быть представлена следующим образом. Газ, выходящий из направляющих каналов завихрителя, разделяется на два потока, один из которых направлен в полость электрода, а другой — в сопло. Вначале каждый из потоков представляет собой несколько отдельных жгутов (по количеству направляющих каналов завихрителя), расположенных у стенок и закрученных по спирали в соответствующую полость. Шаг между витками спирали определяется соотношением значения давления в направляющем канале и геометрическими размерами полости.

Поток газа, направленный в сопло, практически сразу выносится за пределы плазматрона. Из-за высокой скорости этого потока под действием центробежных сил в осевой области образуется разрежение, что приводит к формированию возвратного потока сопла (рис. 7). Поток газа, движущийся в полость электрода, имеет более сложный характер распределения. По мере продвижения этого потока вдоль электрода оказываемое им давление на стенку ослабевает. Это может быть результатом как повышения скорости потока за счет раскручивания в вихре, так и естественного расширения газа в отдельных жгутах и постепенного слияния их в общий пристеночный поток.

Расширение газа и постепенное выравнивание плотности потока может происходить не только по поверхности электрода, но и внутрь — к оси электрода. В зависимости от давления подаваемого газа и глубины полости (при всех прочих равных условиях) у глухого торца полого электрода может образовываться вращающийся поток с равной по всему сечению полости электрода плотностью. Если же падение давления связано преимущественно с повышением скорости пристеночного потока, то возвратный осевой поток электрода может быть сформирован за счет отражения от торцевой поверхности и в начале его продвижения к соплу вообще не соприкасаться с пристеночным потоком.

Оставляя пока открытым вопрос о том, где и как формируется возвратный поток полого электрода, отметим лишь, что такой поток существует и имеет, по всей видимости, вихревой характер движения. В проведенных на модели плазматрона экспериментах на торцевой поверхности поршня замечены следы потоков, свидетельствующие о формировании именно вихревого возвратного потока.

Если принять, что возвратный поток полого электрода имеет вихревой характер движения, то по мере продвижения к завихрителю, как и пристеночный поток под действием центробежных сил, он должен расширяться и стремиться к стенкам электрода. Здесь происходит взаимное проникновение пристеночного и возвратного потоков. Возможные срывы потоков и возникающие турбулентности могут не оказывать существенного влияния на характер потоков в целом, если учитывать наличие отдельных жгутов, неравномерность плотности потоков, а также допустить, что вращение возвратного потока происходит в обратном направлении к пристеночному потоку. Именно в этом случае пересечение двух встречных вихревых потоков и возникающие в результате их столкновений турбулентности будут минимальными.

Сразу за электродом при входе возвратного потока электрода в сопло расположена еще одна область пересечения встречных потоков (рис. 7, область 7). Здесь происходит пересечение не только пристеночного и возвратного потоков, но и двух встречных (в сопло и электрод) потоков. По всей видимости, оба возвратных потока затягиваются в кольцевой зазор напорного коллектора между отдельными вихревыми жгутами, где происходит их перераспределение. Одна часть возвратного потока электрода может подхватываться пристеночным потоком и снова уноситься в электрод, а другая (рис. 7, область 8) — смешиваться с пристеночным потоком сопла и выноситься за пределы плазматрона.

Правомочность предложенной гипотетической схемы распределения газовых потоков в плазматроне с полым электродом без учета влияния плазменно-дугового разряда предстоит проверить, используя различные способы визуализации газовых потоков.



Следует отметить, что проведенные исследования являются предварительными, оценочными. Они должны быть продолжены, что позволит создать мощный, надежный, с высоким ресурсом металлургический плазматрон с полым электродом.

### Выводы

1. Показано, что газ, поступающий из завихрителя плазматрона с полым электродом, разделяется на пристеночные вихревые потоки сопла и полого электрода. В осевой зоне полого электрода формируется возвратный поток газа. В осевой зоне от сопла до завихрителя образуется область пониженного давления, в результате чего возникает поток газа, втягиваемый в сопло из окружающей атмосферы.

2. Установлено, что возвратный поток полого электрода имеет форму конуса и проникает в пристеночный поток. Возвратные потоки как полого электрода, так и сопла затягиваются в кольцевой зазор напорного коллектора и перераспределяются в пристеночные потоки.

3. Для повышения ресурса плазматрона дальнейшие исследования должны быть направлены на создание благоприятных условий для увеличения протяженности зоны пониженного давления и степени ее разрежения, которая сможет обеспечить контролируемую диффузионную привязку пятна плазменной дуги.

1. *Электродуговые генераторы термической плазмы* / М.Ф. Жуков, И.М. Засыпкин, А.Н. Тимошевский и др. — Новосибирск: Наука, 1999. — 712 с.

2. *Кривцов В.С., Планковский С.И.* Проблемы создания высокоресурсных сильноточных электродуговых плазматронов // *Авиационно-космическая техника и технология.* — 2005. — № 7. — С. 7–20.
3. *Митрофанов Н.К., Школьник С.М.* Две формы привязки атмосферной дуги постоянного тока в аргоне к термоэмиссионному катоду // *Журн. техн. физики.* — 2007. — **77**, № 6. — С. 34–44.
4. *Атаманюк В.И.* Разработка путей и средств повышения стабильности формирования швов при сварке неплавящимся электродом: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Волгоград, 2008. — 19 с.
5. *Мухаева Д.В.* Электро- и энергоперенос в прикатодной области дугового разряда: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — М., 2011. — 20 с.
6. *Меркулов В.В.* Исследование тепловых и электрических характеристик плазматрона с самоустанавливающейся длиной дуги: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Улан-Удэ, 2005. — 20 с.
7. *Гриценко А.А.* Разработка и обоснование характеристик плазматрона косвенного действия для обработки биоткани: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — М., 1992. — 16 с.
8. А.с. 1748616 СССР, МПК Н 05 В 7/22. Анодный узел электродугового плазматрона / М.Ф. Жуков, С.П. Ващенко, Г.-Н.Б. Дандарон, Х.Ц. Зяятуев. — Опубл. 10.09.95; Бюл. № 25.
9. *Жуков М.Ф., Коротеев А.С., Урюков Б.А.* Прикладная динамика термической плазмы. — Новосибирск: Наука, 1975. — 298 с.
10. *ВЧ- и СВЧ-плазматроны* / С.В. Дресвин, А.А. Бобров, В.М. Лелевкин и др. — Новосибирск: Наука, 1992. — 319 с.
11. *Меркулов А.П.* Вихревой эффект и его применение в технике. — М.: Машиностроение, 1969. — 182 с.
12. *Вихревые аппараты* / А.Д. Суслов, С.В. Иванов, А.В. Мурашкин, Ю.В. Чижиков. — М.: Машиностроение, 1985. — 256 с.
13. *Мощный неравновесный вихревой СВЧ разряд большого объема на воздухе атмосферного давления* / А.А. Бобров, И.К. Киселев, В.М. Лелевкин и др. // *Плазмохимия* 91. — М.: ИХХС АН СССР, 1991. — С. 88–118.

The work is aimed at studying the main gasdynamic characteristics of hollow cathode plasmatron that should eventually lead to development of metallurgical plasmatron with longer service life. Interrelation between the eddy effect and gas dynamics of plasmatron hollow electrode is shown. The paper gives a description of physical model of a plasmatron with a hollow cathode for investigation of gas flow distribution in it. It is shown that the near-wall flow at vortex exit consists of several separate spirally twisted braids, directed both into the electrode, and into the nozzle. As a result, a lower pressure area forms in the central part of the cavity. Change of pressure of near-wall eddy flow on the hollow electrode wall at this flow moving away from the vortex chamber is determined, depending on the depth of electrode cavity and pressure of gas fed into the vortex chamber. Distribution of pressure of gas outflow across the section of plasmatron model nozzle is determined. Proceeding from published data analysis and our own preliminary experiments, a hypothetical scheme of gas flow motion in the plasmatron with a hollow electrode is proposed. Ref. 13, Figures 7.

**Keywords:** *plasmatron service life; hollow electrode; eddy effect; plasmatron model; gas flow pressure; lower pressure area; schematic of gas flow motion*

Поступила 12.07.2013