

Широкие возможности индукционной плазменной ВЧ модификации различных материалов при пониженном давлении [1, 2] и растущий интерес к её применению ставит перед конструкторами новые задачи совершенствования технологического оборудования. Ключевым узлом вакуумной установки для проведения процесса обработки является индукционный ВЧ плазматрон. Конструкция плазматрона представляет собой разрядную трубку, разделяющую вакуумированный объем рабочей камеры от атмосферы, которая охватывается индуктором, состоящим из нескольких витков медной, водоохлаждаемой трубки. Конструкция разрядной трубки должна предотвращать индуцирование в ней паразитных ВЧ токов, которые вызывают нагрев и падение вкладываемой мощности в разряд. Таким образом, трубку изготавливают либо из изоляционного материала, либо из набора металлических секций, разделенных между собой изоляторами. Наибольшее распространение получило применение прозрачного кварца, в качестве материала разрядной трубки. Кварцевое стекло способно выдерживать воздействие высоких температур (температура размягчения 1400°C), имеет низкий коэффициент линейного расширения ($0,5 \cdot 10^{-6}$), что уменьшает вероятность растрескивания при перепадах температур. Температура на внутренней, контактирующей с плазмой стенке кварцевой трубки может достигать тысячи градусов, поэтому требуется принудительное охлаждение плазматрона [3, 4]. На рис. 1 представлен эскиз водоохлаждаемого плазматрона, применяемый коллективом авторов статьи. Рис. 1 - Трубка разрядная водоохлаждаемая. Однако данная разрядная трубка имеет ряд недостатков: дороговизна и нетехнологичность в изготовлении; требуется подвод коммуникаций с водой; опасность прорыва воды в вакуумный объем, что может быть губительным для внутрикамерных устройств и насосов. При работе с природным газом, в качестве плазмаобразующего, на трубке происходит осаждение углеродной пленки, которая ухудшает теплообмен и вызывает перегрев стенок, ресурс трубки резко снижается и требуется периодическая смена кварцевого плазматрона. Решением этих проблем явился переход от водоохлаждаемой схемы к воздушному охлаждению стенок разрядной трубки. Схема плазматрона в составе исследовательского вакуумного стенда представлена на рис. 2. Плазматрон (2) представляет собой кварцевую трубку внешним диаметром 30 мм и толщиной стенки 3 мм. С внешней стороны, вдоль трубки, подается осевой поток воздуха через газораспределительную муфту (1). Источником сжатого воздуха служит вихревая воздуходувка MSHBL-100-150(K1). К колебательному контуру, состоящему из индуктора (L) и подстроечного конденсатора (C), подводится ВЧ (13,56 МГц) напряжение от генератора (ВЧГ) АЕСesar 1330. Для автоматического согласования генератора с нагрузкой используется согласующее устройство (СУ) AEVarioMatch 5000. Плазматрон монтируется на вакуумной камере (CV1). Средства откачки - вакуумный агрегат АВР-150, состоящий из форвакуумного насоса АВЗ-20Д (NL1) и бустерного ДВН-

150 (NZ1). Вакуумметрия - датчик мембранный емкостной MKS 627B (PD1). Подача рабочего газа, аргона, осуществляется через регулятор массового расхода MKS 1179A (VF1). Используя плазматрон с водяным охлаждением, было проведено калориметрирование для определения тепловых потерь на стенках плазматрона - при различной подаваемой от генератора ВЧ мощности замерялись расход и перепад температуры хладоносителя на выходе и входе в плазматрон. Приближенное значение количества тепла, выделившегося на стенке плазматрона, определяется по формуле [5]: - массовый расход хладогента, кг/с; - изобарная теплоемкость воды; - перепад температуры, К. Рис. 2- Схема вакуумной установки с плазматроном воздушного охлаждения. Таким образом, тепловые потери на стенках разрядной трубки в рабочем режиме, при подводимой мощности 2 кВт, составили 1,25 кВт. Был проведен поверочный стационарный тепловой расчет плазматрона в САЕ пакете ANSYS Workbench. При постановке задачи использовались следующие допущения: объект является симметричным телом вращения, поэтому для ускорения расчетов используется половина модели; зона, на которой выделяется тепло из разряда, находится внутри индуктора; не учитывается конвективный отвод тепла с внутренней стороны трубки разреженным потоком газа; теплоотвод потоком воздуха с внешней стороны идет не со всей поверхности трубки, а обрывается на расстоянии 30 мм от нижнего витка индуктора; теплообмен с остальных поверхностей свободный, с коэффициентом теплоотвода стоячего воздуха 5,6 Вт/(м²•К). На рис. 3 представлена расчетная схема. Коэффициент теплоотвода потоком воздуха определяется по формуле [6]: v - скорость воздушного потока, м/с. Коэффициент теплоотвода вычисляется исходя из характеристик воздухоудувки, потерь на воздушной магистрали, выходного сечения. Для нашей системы расчетное значение коэффициента теплоотвода составило 470 Вт/(м²•К). На рис. 4 представлена расчетная картина распределения температуры в зоне разряда. Рис. 3 - Расчетная схема с граничными условиями. Рис. 4 - Распределение температуры в зоне разряда. Из-за низкого коэффициента теплопроводности кварца наблюдается задержание распространения тепла в осевом направлении и, как следствие, локализация температуры в зоне горения разряда. Максимальная температура на внутренней поверхности кварцевой трубки и составляет 1023 °С. Температура внешней поверхности плазматрона 560 °С. Полученные результаты хорошо коррелируются с экспериментальным измерением температуры внешней поверхности кварцевой трубки при помощи пирометра АКТАКОМ АТЕ-2509, которая оказалась несколько выше и равняется 590 °С. Таким образом, погрешность предложенной расчетной модели составляет порядка 5% и может применяться для проведения поверочных или проектных инженерных расчетов.