

04

## **”Экологический” плазмотрон трансформаторного типа**

© Э.Б. Кулумбаев, В.М. Лелевкин

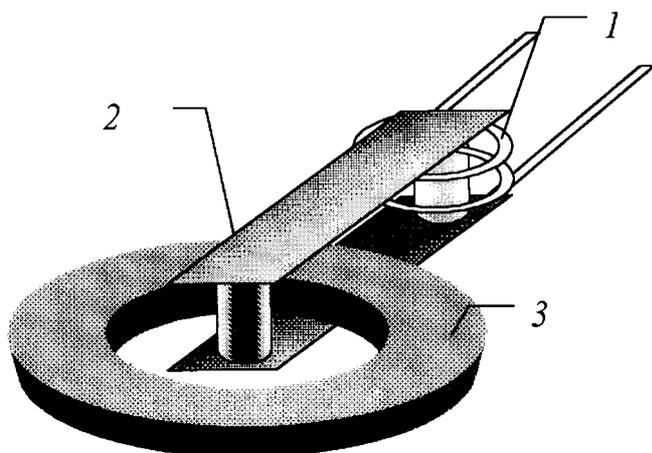
Кыргызско-Российский (Славянский) университет, Бишкек

Поступило в Редакцию 25 ноября 1997 г.

На основе математической модели индукционного тороидального разряда трансформаторного типа установлена картина течения газа в сечении кругового тора. Предложен способ поперечной к круговой оси прокачки и нагрева вводимого холодного газа. Сделан вывод о возможности создания ”экологического” плазмотрона трансформаторного типа.

”Экологический” плазмотрон для переработки вредных газообразных веществ под воздействием высокой температуры должен обеспечивать удобный ввод газа, интенсивный его разогрев, разложение на составные части с дальнейшей эффективной закалкой продуктов разложения. Наиболее трудным требованием к конструкции является прокачка вводимого газа через высокотемпературную область газового разряда.

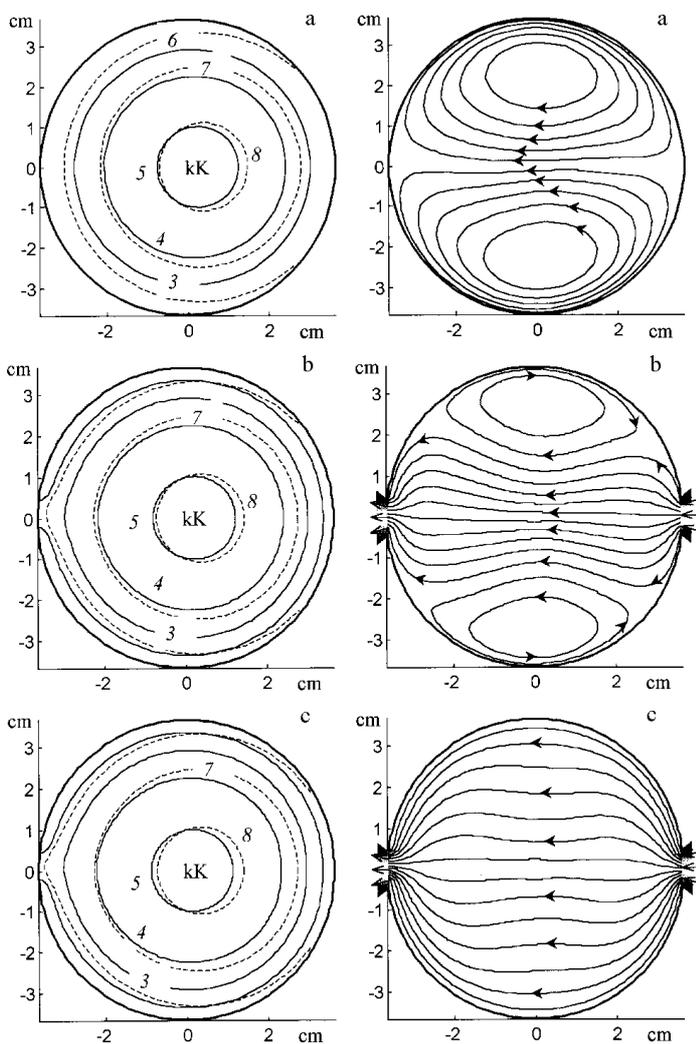
Способ возбуждения низкочастотного разряда реализован в устройствах, получивших название трансформаторного плазмотрона [1], где безэлектродная плазма поддерживается за счет выделения джоулева тепла замкнутых индукционных токов, образующих вторичный виток связанный магнитопроводом с первичной обмоткой. Исследования [2–5] показали ряд достоинств индукционных разрядов трансформаторного типа в различных областях применения плазмы: получение спектрально чистой плазмы, практически неограниченный ресурс работы, преимущество простого источника питания по сравнению с источниками безэлектродных разрядов высокочастотных и сверхвысокочастотных устройств [1]. Экспериментально установлено [5], что при давлении до 0.2–0.3 ат разряд горит в устойчивом режиме и заполняет практически все сечение разрядной камеры. При повышении давления появляются радиальные колебания и для стабилизации разряда применяется продольная вихревая прокачка газа.



**Рис. 1.** Схема трансформаторного плазмотрона: 1 — первичная обмотка, 2 — магнитопровод, 3 — разрядная камера.

В данной работе на основе математической модели индукционного тороидального разряда трансформаторного типа установлена картина течения газа под действием электромагнитной и гравитационной сил в круговом торе без вынужденного азимутального продува газа. Полученная газодинамическая структура течения в поперечном сечении кругового тора показала возможность создания "экологического" плазмотрона на основе данного разряда.

Рассмотрим индукционный разряд в круглом торе, охватывающем магнитопровод с гармоническим магнитным потоком (рис. 1). Плазменное состояние газа поддерживается за счет выделения джоулева тепла индукционных круговых токов. Характеристики трансформаторного разряда описываются в рамках двухтемпературного магнитогазодинамического приближения плазмы на основе уравнений Навье–Стокса, непрерывности и энергии для электронного газа и газа тяжелых частиц, квазистационарных уравнений Максвелла, условия квазинейтральности, законов Ома и Дальтона. Решение проводится методом конечных разностей. Сходимость и единственность решения подтверждается численным экспериментом на различных сетках.



**Рис. 2.** Поля температур электронов (пунктирные линии), тяжелых частиц (сплошные) и линии тока газа (векторные) в тороидальном разряде при давлении 7 кПа, токе 200 А в зависимости от скорости радиального вдува холодного газа: 0 (a); 1 (b); 10 (c) см/с.

В качестве примера проведены расчеты характеристик индукционного тороидального разряда трансформаторного типа в аргоне по данным эксперимента [5] при давлении 7 кПа, токе 200 А, частоте электромагнитного поля 10 кГц, горящего в круговой тороидальной камере с периметром оси 230 см и радиусом сечения 3.65 см.

Результаты представлены на рис. 2. Видно, что плазма термически неравновесная по всему сечению разрядной камеры. Максимумы температуры (электронов 8220 К; тяжелых частиц 5230 К) смещены к центру кривизны оси тора (рис. 2, *a*). Расчетное значение вторичного напряжения 140 В согласуется с экспериментом 148 В [5]. В разрядной камере под действием амперовой и архимедовой сил формируются два тороидальных вихря (рис. 2, *a*). Направление течения плазмы в центральной области зависит от соотношения между действующими силами. При токе разряда 200 А преобладают электромагнитные силы и в центре тора реализуется течение от центра кривизны оси тора с максимальной скоростью  $\sim 12$  см/с. При давлении 7 кПа влияние газодинамических характеристик на тепловые и электромагнитные параметры разряда незначительно.

Полученная картина течения позволяет предложить способ поперечной к оси тора прокачки газа через разряд. Для этого ввод и вывод газа необходимо производить через диаметрально противоположные кольцевые щели или системы отверстий в стенке тороидальной камеры. Для определения газодинамической структуры разряда с поперечной прокачкой проведен расчет в зависимости от скорости радиального вдува (вариант 1 — 1 см/с; 2 — 10 см/с) газа через кольцевую щель высотой 7.5 мм. Видно (рис. 2, *b*), что в первом случае вихревой характер течения в торе сохраняется. Расширение из-за нагрева вводимого холодного газа уменьшает площадь тороидальных вихрей, которые препятствуют тангенциальному течению вводимого газа по стенкам камеры и обеспечивают протекание всего количества газа через высокотемпературную область. При увеличении скорости вдува газа в 10 раз (рис. 2, *c*) вихревой структуры течения не образуется. В обоих случаях тепловые и электромагнитные параметры разряда изменились мало.

Результаты расчета показали, что для поперечной прокачки газа существуют условия, при которых весь вводимый газ протекает через высокотемпературную область разряда. Это указывает на возможность создания "экологического" плазмотрона трансформаторного типа. Под-

бором внешних параметров и оптимизацией режимов работы плазмотрона интенсивным нагревом в области разряда можно разложить ядовитые химические соединения, произвести закалку по выходу газа из отверстий тора и получить экологически чистые газы.

## Список литературы

- [1] Дресвин С.В., Бобров А.А., Лелевкин В.М. и др. // ВЧ- и СВЧ-плазмотроны. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1992.
- [2] Eckert H.U. // AIAA J. 1971. V. 9. N 8. P. 1456–1472.
- [3] Рыкалин Н.Н., Кулагин И.Д., Николаев А.В. и др. // Физика и химия обраб. материалов. 1977. № 4. С. 155–156.
- [4] Гольдфарб В.М., Донской А.В., Дресвин С.В. и др. // ТВТ. 1979. Т. 17. № 4. С. 698–702.
- [5] Коган В.А., Уланов И.М. // ТВТ. 1993. Т. 31. № 1. С. 105–110.