

УДК 546.46:661 846

А. Р. Бикмучев, М. Ф. Вахитов, А. Г. Саттаров,
С. Г. Семенова

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОСЕСИММЕТРИЧНОГО ЗАКРУЧЕННОГО ПРОТИВОТОЧНОГО ПОТОКА РАБОЧЕГО ГАЗА В ОПТИЧЕСКОМ ПЛАЗМОТРОНЕ

Ключевые слова: непрерывный оптический разряд, газодинамическое окно, камера поглощения, сопло, осесимметричный противоточный поток рабочего газа, непроницаемая сфера.

В данной работе представлены результаты численного моделирования процессов течения в оптическом плазматроне с осесимметричным противоточным закрученным потоком рабочего газа в камере поглощения.

Keywords: continuous optical discharge, gas-dynamic window, absorption chamber, nozzle, axial counter flow of actuation gas, impermeable sphere.

In this work results of numerical simulation of processes of a current in optical plasmatron with axial counter swirling flow of actuation gas in absorption chamber are introduced.

Введение

Дальнейшее развитие волоконных, газодинамических, и электроразрядных - CO_2 лазеров ставит перед исследователями задачу их эффективного использования в различных технологических процессах и устройствах. В последние годы особенно успешно развивается направление, связанное с созданием оптических плазмотронов, предназначенных для резки металлов, нанесения покрытий, получения микро и наноструктур [1], [2], [3]. Основными преимуществами данного типа плазмотронов является возможность получения температуры плазмообразующего газа в ядре оптического разряда 16000-18000K для аргона, 25000-30000K для водорода.

При проектировании оптических плазмотронов возникают задачи, связанные с обеспечением устойчивости оптического разряда (ОР) в камере поглощения, смещением горячего ядра с периферийным холодным газом, и т.д. Устойчивость ОР в камере поглощения в радиальном направлении можно обеспечить путем закрутки рабочего газа, а в осевом - обдувом ОР в направлении подвода лазерного излучения. Для решения задачи обеспечения устойчивости ОР наиболее подходит *осесимметричный противоточный закрученный поток рабочего газа в камере поглощения* оптического плазмотрона. В некоторых случаях возникает необходимость получения высокой температуры плазмообразующего газа на выходе из оптического плазмотрона. Решение данных задач без использования современных методов численного моделирования не представляется возможным.

Численное моделирование представляет собой относительно дешевое и в то же время мощное средство, позволяющее понять характер течения рабочего газа в камере поглощения (КП) в газодинамическом окне (ГДО), в сопловой части оптического плазмотрона, что облегчает принятие технических решений, направленных на усовершен-

ствование и повышение эффективности работы данного устройства.

В настоящее время создаются различные комплексы программ (Fluent, Phoenix, CFX и др.), предназначенные как для решения задач газодинамики, так и для произвольной геометрии объектов, в том числе и с возможностью выбора математической модели течения.

В данной работе использовался лицензионный программный пакет "Fluent" предназначенный для решения задач механики жидкости и газа, позволяющий рассчитывать, визуализировать и оптимизировать внутрикамерные процессы в энергетических установках различного назначения, в том числе и в оптическом плазматроне.

Физическая область моделирования. Расчетная сетка

В первую очередь необходимо определить границы объема оптического плазмотрона, на котором будут заданы граничные условия, необходимые для решения уравнений газодинамики.

Численные исследования позволяют изучить внутрикамерные течения в камере поглощения (на рис. 1 выделенная область), в газодинамическом окне и в сопловой части оптического плазмотрона. Далее необходимо проводить сравнение параметров численного эксперимента с данными физического эксперимента с целью верификации полученных результатов. Задачей является исследование изменения газодинамических параметров при различных режимах работы и геометрических размерах ГДО, КП и сопла оптического плазмотрона.

Закрученное течение в КП формируется тангенциальными отверстиями, выполненными перед минимальным сечением сопла (рис. 1).

Избыточное давление в четырех тангенциально подводимых трубках диаметром 0,8 мм меняется от 3 до 12 кгс/см². Объем камеры меняется с изменением длины камеры с 30 мм до 47 мм. Геометрические размеры моделируемого объекта: диа-

метр камеры поглощения – 45 мм; диаметр критического сечения – 5-10 мм; диаметр ГДО – 5-9 мм.

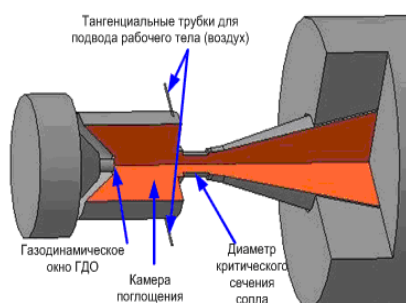


Рис. 1 - Расчетная область моделирования процессов в ГДО, КП и в сопле оптического плазмотрона

Исходные данные для проведения расчетов приведены в таб.

Таблица - Исходные данные для проведения расчетов

Кол-во расчетов	Избыточное давление кгс/см ²	Длина камеры поглощения, мм	Относительный диаметр $D_{ГДО}/D_{кр}$
1	3	30	0,5
2			0,7
3	12	30	0,5
4			0,7
5	12	45	0,5
6			0,7
7	3	45	0,5
8			0,7

Отношение диаметра критического сечения к диаметру ГДО меняется от 0,5 – 0,9. В качестве рабочего тела при проведении численных экспериментов принят воздух.

Правильный выбор сетки является одним из главных критериев создания адекватной и удобной в использовании методики расчета.

Точность численного решения уравнений существенно зависит также и от ориентации потока относительно расчетной сетки. Поэтому для исследуемого участка была выбрана "неструктурированная" расчетная сетка, обеспечивающая заданную точность в исходных условиях на численный результат и сходимость итерационного процесса.

Для наилучшего моделирования пограничного слоя на цилиндрической поверхности камеры поглощения была построена сетка с уменьшенными ячейками, с соответствующей топологией геометрии расчетной области. Для этого расчетная область камеры поглощения в виде цилиндра была разделена и представлена несколькими объемами, с сечением в виде топологического прямоугольника и тетраэдральной сгущенной сетки перед входом в сопло оптического плазмотрона.

Численная сходимость фиксировалась при стабилизации расходов и давлений на проницаемых границах расчетной области и при достижении максимальной величины равной 0,0001 средне-квадратических невязок во всех уравнениях.

Физико-математическая модель течения рабочего газа в камере поглощения оптического плазмотрона

В системе «ГДО - КП - сопло» при подводе рабочего газа в тангенциальные трубки возникает сложная газодинамическая структура потока с изменяемыми по радиусу скоростями и давлениями. В результате закрутки рабочего газа перед критическим сечением сопла оптического плазмотрона образуются сложные слоистые вращательные течения, в которых осевые составляющие направлены в противоположную сторону. Основной задачей при проведении исследований является численное моделирование данных турбулентных течений.

В настоящее время известны три модели турбулентности: прямое численное моделирование (DNS), метод крупных вихрей (LES) и осреднение уравнений Навье-Стокса по Рейнольдсу (RANS). Первые два подхода могут быть применены только в трехмерной постановке, так как действительное турбулентное течение трехмерно. Реализации прямого численного моделирования турбулентного течения требует компьютерные ресурсы, доступные только для мощных кластеров. Потребности метода крупных вихрей значительно выше, чем при использовании RANS моделей турбулентности. Разрешение турбулентных масштабов в инерционной подобласти спектра требует использования мелкой сетки во всей расчетной области с одинаковыми по всем направлениям размерами ячеек. Имеется также необходимость в формировании граничных условий с нужным спектром пульсаций, которые накладывают серьезные ограничения на применение LES моделей турбулентности. Для решения поставленных нами задач наиболее приемлемым является метод, базирующийся на решении осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса с использованием RANS модели турбулентности. В основном RANS модели турбулентности строятся путем осреднения по Рейнольдсу уравнений движения Навье-Стокса. При решении поставленных задач будут использованы уравнение неразрывности, уравнение Рейнольдса, модель турбулентного потока несжимаемой жидкости, уравнение энергии, закон Фурье и уравнения состояния.

Уравнение неразрывности имеет вид:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j) = 0 \quad (1)$$

Уравнение Рейнольдса для анализа турбулентных течений:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \bar{u}_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \bar{u}_i \bar{u}_j) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \bar{u}_i' \bar{u}_j') = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad (2)$$

где $\bar{u}_i, \bar{u}_j$ - осредненные по времени значения скоростей;
 $\bar{u}_i', \bar{u}_j'$ - пульсационные составляющие скоростей;

$$(\rho \bar{u}_i \bar{u}_j) = -\mu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) + \frac{2}{3} \rho \delta_{ij} \kappa,$$

где μ_t - коэффициент турбулентной вязкости;
 $\kappa = 0.5(\bar{u}_i \bar{u}_j)$ - кинетическая энергия турбулентности; $\delta_{ij} = 1$ при $i = j$, $\delta_{ij} = 0$, при $i \neq j$.

Уравнения (1) и (2) описывают движение сжимаемого газа без учета массовых сил и при отсутствии дополнительных источников и стоков массы. Дополнительные члены в данных уравнениях включают пульсационные значения $\rho \bar{u}_i \bar{u}_j$ параметров.

Данные значения параметров характеризуют перенос импульса пульсациями в поперечном направлении. Поперечные составляющие пульсаций являются неизвестными функциями и поэтому требуются дополнительные условия для их определения для замыкания системы уравнений Навье-Стокса. Дополнительные условия для замыкания данных уравнений представляют собой модели турбулентности. Модель турбулентного потока несжимаемой жидкости основана на уравнении:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \kappa) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \bar{u}_j \kappa) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_\kappa \frac{\partial \kappa}{\partial x_j} \right) + P_\kappa - \rho \varepsilon \quad (3)$$

где $\kappa = \bar{u}_i \bar{u}_j / 2$ - удельная энергия турбулентных пульсаций,

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \bar{u}_j \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_\varepsilon \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) +$$

$$+ \frac{\varepsilon}{\kappa} (C_{\varepsilon 1} P_\kappa - \rho C_{\varepsilon 2} \varepsilon),$$

$P_\kappa = -\rho \bar{u}_i' \bar{u}_j' \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j}$ - член, выражающий генерацию энергии κ ,

$$\Gamma_\kappa = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\kappa}, \quad \Gamma_\varepsilon = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}.$$

Параметры ε и μ_t определяются следующим образом:

$$\varepsilon = \frac{\mu}{\rho} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right)^2, \quad \mu_t = \rho C_\mu \frac{\kappa^2}{\varepsilon}.$$

Константы $\kappa - \varepsilon$ модели,

$$C_{\varepsilon 1} = 0.09; C_{\varepsilon 1} = 1.44; C_{\varepsilon 2} = 1.92; \sigma_\kappa = 1.0; \sigma_\varepsilon = 1.3.$$

где $\sigma_\kappa, \sigma_\varepsilon$ - числа Прандтля. Уравнение энергии имеет следующий вид:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho H) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \bar{u}_j H) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \bar{u}_j' H') = -\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \times \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - Q_j \right] \quad (5)$$

Полная энтальпия H связана с полной энергией E , внутренней энергией e и статической или удельной энтальпией h следующими соотношениями:

$$H = E + PV, \quad e + \frac{u_1^2}{2} + \frac{P}{\rho} = h + \frac{u_1^2}{2}.$$

Величина Q_j выражает поток энергии, передаваемый газу за счет теплопроводности, в соответствии с законом Фурье имеет вид:

$$Q_j = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x_j}, \quad (6)$$

где λ - коэффициент теплопроводности, является функцией температуры, $\lambda = f(T)$.

Из уравнения состояния определяется величина давления P :

$$P = \rho RT, \quad (7)$$

Решение уравнений (1-7) позволяет получить зависимости изменения параметров течения по длине и по радиусу для разных сечений ГДО, КП и сопла оптического плазмотрона.

Обсуждение результатов численного моделирования внутрикамерных течений ЛРД

Из выполненных расчетов приводились только те, на основании которых можно было бы осуществить сопоставление расчетных значений параметров с результатами экспериментов.

Целью расчетов являлось определение направленности движения потоков при изменяемых значениях избыточного давления в тангенциальных трубках и геометрических размеров ГДО, КП и сопла оптического плазмотрона. Расчеты проводились в точках, где уже известны экспериментальные данные. Численное моделирование потоков на холодном режиме (без подвода тепла) позволяет понять перераспределение течения модельного газа во внутрикамерном пространстве.

Кроме того появляется возможность:

- проведения верификации принятой модели;
- исключения ошибки проведения экспериментов по выбору оптимальной конструкции и внесения изменения в конструкцию для оптимизации внутрикамерных процессов.

Параметрами, которые выбраны в процессе моделирования являются значения избыточного давления на входе в коллектор тангенциально расположенных трубок, численно равные 12.0, 8.0, 4.0 [кгс/см²] и длины камеры поглощения, равные - 30.0, 37.0, 45.0 [мм]. Расчеты выполнены при различных значениях диаметра входного отверстия газодинамического окна и диаметра критического сечения сопла (т.е. для различных соотношений

площади окна к площади критического сечения сопла $F_{отн.}$).

Как отмечалось выше оптимальными режимными и геометрическими параметрами по результатам холодных испытаний, являются длина КП -30 мм, давление рабочего газа на входе в КП- $12 \cdot 10^5$ [Па].

Численная модель для подготовки к выполнению расчетов импортировалась в сеточный редактор Gambit 6.4.2, где разбивалась на 7 объемов, соединенных между собой проницаемыми границами.

Камера поглощения была разделена на 55457 элементов. С целью увеличения точности расчета сетка сгущалась около входных трубок до 0,3 мм, около входа в сопло и около окна для лазерного луча – до 1.0 мм. Максимальный размер ячеек составлял – 2.0 мм. Общее число элементов равняется: 203264. На рис.3 представлен общий вид сетки.

В качестве модельного газа принят атмосферный воздух с постоянным давлением. Для замыкания уравнений использовалась полуэмпирическая модель k-epsilon.

В камере поглощения наблюдается направленность линий тока в сторону ГДО, т.е. происходит нежелательное истечение модельного рабочего газа из газодинамического окна, что связано с отношением площади газодинамического окна к площади критического сечения сопла

$$D_{отн.} = \frac{D_{ГДО}}{D_{кр}} = 1,0, \text{ что подтверждается ре-}$$

зультатами экспериментальных исследований.

Как следует из расчетов, через ГДО осуществляется эжекция воздуха из окружающей среды, что удовлетворительно согласуется с результатами экспериментальных исследований.

При дальнейших расчетах использовали те же размеры геометрии КП и ГДО, с разницей лишь в два дополнительных добавленных объема со стороны ГДО 1 и сопла 3 (рис.1).

Как следует из выполненных расчетов, модельный газ, подведенный в КП через тангенциальные трубки, движется, закручиваясь вдоль стенок камеры в сторону ГДО (1), разворачивается от стенки переднего днища КП и движется в обратном направлении в сторону минимального сечения сопла. Атмосферный воздух из окружающей среды (3) эжектируется в КП через ГДО, далее проходит через приосевую зону камеры и истекает через минимальное сечение сопла в атмосферу.

На рис.2 проведены поперечные сечения вдоль камеры поглощения с определенным шагом. Рассмотрим распределение скоростей и давлений во внутрикамерном объеме. Результаты расчетов распределения осевых и тангенциальных скоростей рабочего газа по радиусу камеры на расстояниях L_y от торца выходного сечения камеры, на которых проявляются наиболее значительные градиенты изменения параметров потока $L_y = 3.0, 10.0, 29.0$ [мм] представлены на рис.3. Из анализа результатов расчета следует, что осевые течения внутри камеры

можно разделить на три зоны.

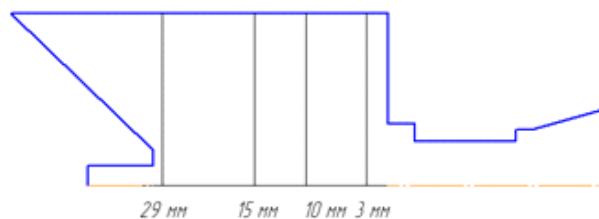


Рис. 2 - Сечения в камере оптического плазмотрона для построения графиков

Периферийное течение закрученного потока модельного газа от минимального сечения в сторону ГДО с максимальной скоростью 32.0 [м/с] на радиусе камеры поглощения 21.0 [мм] характеризует первую зону.

Промежуточное течение в сторону минимального сечения КП с максимальными осевыми скоростями 18.0 [м/с] представляет собой вторую зону. На расстоянии $L_y = 10.0$ [мм] от торца стенки критического сечения максимум осевой скорости находится на радиусе 17.0 [мм.] На расстоянии $L_y = 29.0$ [мм] этот максимум осевой скорости сдвигается на 2.0 [мм] в приосевую зону и находится на радиусе 15.0 [мм].

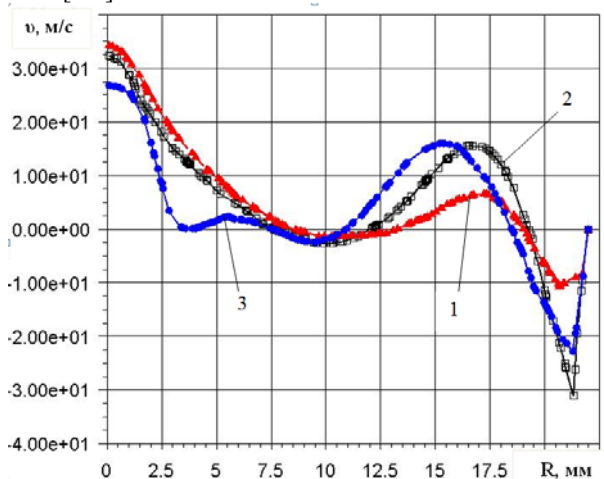


Рис. 3 - Изменение абсолютной осевой скорости по радиусу камеры ЛРДР, на расстояниях L_y от торца камеры со стороны критического сечения: 1 - $L_y = 3.0$ мм; 2 - $L_y = 10.0$ мм; 3 - $L_y = 29.0$ мм

Рециркуляционное течение включает приосевое течение в сторону минимального сечения сопла, которое осуществляется с максимальной осевой скоростью 35.0 [м/с] и относится к третьей зоне. Третья зона на радиусе 10 мм распространяется на всю длину камеры поглощения, представляя течение с максимальной осевой скоростью 2.0 [м/с].

Выводы

В результате выполненных теоретических исследований получена картина течения противоточного осесимметричного закрученного потока рабочего газа в камере поглощения оптического плазмотрона. Получены данные по изменению абсо-

лютной осевой скорости по длине камеры на различных расстояниях от торца камеры.

Литература

1. Кашапов Н.Ф., Лучкин Р.Г. Моделирование состава низкотемпературной плазмы азота // Вестник КГТУ. 2011. - №24. - С. 43-47.
2. Саттаров А.Г. Оптический плазмотрон на основе непрерывного оптического разряда / А.Г. Саттаров, М.Ф. Вахитов // Вестник КГТУ - 2009. - №3. - С. 17-20.
3. Саттаров А.Г. Исследование внутрикамерных процессов в энергетических установках на основе оптического разряда / А.Г. Саттаров, А.Р. Бикмучев, М.Ф. Вахитов, М.Ю. Коротков // Вестник КГТУ - 2009. - №3. - С.35 - 39.
4. Кулумбаев Э.Б., Лелевекин В.М. Непрерывный оптический разряд в закрученном газовом потоке // Физика плазмы. 1999. Т. 25. № 2. С. 205–208.
5. Гуськов К.Г., Райзер Ю.П., Суржиков С.Т. О наблюдаемой скорости медленного движения оптического разряда // Квантовая электроника. 1990. Т. 17, № 7. С. 937 - 942.

© **А. Р. Бикмучев** - канд. техн. наук, науч. сотр. НИИ ЦПК имени Ю.А. Гагарина», A.Bikmuchev@gctc.ru; **М. Ф. Вахитов** – инж. КНИТУ, vmfkzn@bk.ru; **А. Г. Саттаров** - д-р техн. наук, доц. КНИТУ; **С. Г. Семенова** - зав. лаб. каф. ТОМЛП КНИТУ, ssemyonova@mail.ru.