

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

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ 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 верификации экспериментов с расчетными данными. В ходе экспериментальных исследований выявлен эффект фон Энгеля-Штеенбека применительно к оптическому разряду. Определены режимы работы оптического плазматрона, при которых поддерживается данный эффект.

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

In this work results of verification of experiments with calculation data are introduced. During experimental investigations von Engel-Steenbeck's effect with reference to the optical discharge is revealed. Modes of operation of optical plasmatron at which this effect is supported are determined.

Верификация полученных результатов расчета

В ходе моделирования внутрикамерных течений проводилась верификация используемой численной модели путем сравнения полученных численных результатов с экспериментальными данными. Проводилось сравнение измеренного давления разрежения в газодинамическом окне (ГДО) и в камере поглощения (КП) с последующим сопоставлением с численными расчетами.

В табл.1 и на рис. 1 представлены результаты сравнения

Таблица 1 - Результаты экспериментов и моделирования

	Избыточное давление в подводящих трубках		
	4.0[кгс/см ²]	8.0[кгс/см ²]	12.0[кгс/см ²]
Длина КП =30[мм] эксперимент	0,0135	0,0340	0,0580
Численный расчет	0,0190	0,0450	0,0670
Длина КП =37 [мм] эксперимент	0,0145	0,0354	0,0558
Численный расчет	0,0160	0,0390	0,0650
Длина КП =47 [мм] эксперимент	0,0130	0,0312	0,0520
Численный расчет	0,0142	0,0400	0,0500

При давлении на входе в коллектор КП $4.0 \cdot 10^5$ [Па] относительное отклонение расчетных значений давлений от экспериментальных, составило 5%. Последующее повышение давление на

входе в КП до $12.0 \cdot 10^5$ [Па] приводит к относительному отклонению до 10%.

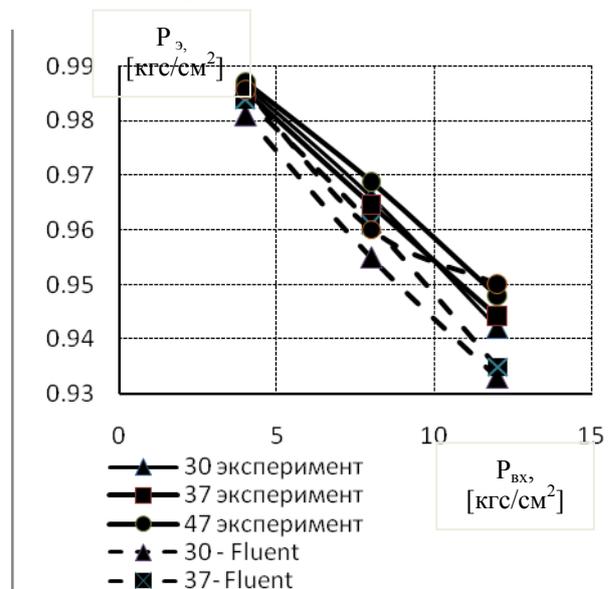


Рис. 1 - График изменения разрежения в зависимости от давления газа на входе $P_{вх}$, [кгс/см²], и L_k , [мм]

При проведении эксперимента осуществлялось измерение статического давления по длине камеры поглощения. Результаты измерений использовались для верификации принятой модели.

На стенке КП модельного оптического плазматрона, изготовленного из оргстекла, выполнены каналы (отверстия) диаметром 0,4 [мм] и длиной 2.0[мм] для измерения статического давления. Каналы соединены с трубкой диаметром 6.0[мм] с манометром для измерения статического давления.

Экспериментальные данные, полученные в ходе опытов, сравнивались с численными значениями (рис.2).

При давлении на входе в коллектор $3.0 \cdot 10^5$ [Па] относительное отклонение расчетных

значений давлений от экспериментальных, в начале КП на расстоянии от входных трубок 15 [мм], составило 7 %. На выходе из КП, на расстоянии от входных трубок 58,5 [мм], за счет уменьшения тангенциальных скоростей, уменьшилась и составила 5 %.

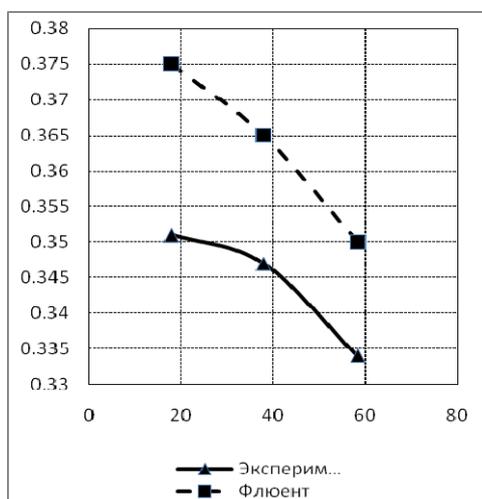


Рис. 2 - График изменения статического давления по длине камеры поглощения, при давлении на входе $P_{вх} = 3 \text{ кгс/см}^2$

Выполнялось качественное сравнение тока в пристеночном слое газа методом масляных капель. Экспериментальные данные, по масляному рассекаемому отпечатку, сравнивались с результатами численных расчетов.

Метод масляных капель заключается в принудительном введении масла, перемешанного с порошком графита, на внутреннюю поверхность КП модельной установки. В соответствии с данным методом угол, который отображал поведение течения потока в пристеночной области, определялся по следу масла, которое растекалось вдоль внутренней поверхности цилиндрической камеры поглощения под воздействием газового потока. При этом установку включали на 3-5 сек до выдержки требуемого режима течения. На приведенных рисунках показано, что теоретические результаты совпадают с экспериментальными, а угол составляет 10-11 градусов при давлении на входе в КП $3.0 \text{ [кгс/см}^2\text{]}$.

При выполнении расчетов нами за основу принята модель твердой непроницаемой сферы с температурой в ядре -16 000 K . Радиус сферы принимаем $R=8 \text{ мм}$, что соответствует реальным размерам плазмы, образованным оптическим разрядом (ОР). Лучистые потери и поглощение лазерного излучения сферой определялось в соответствии с методикой изложенной [1,2].

Результаты экспериментальных исследований

При проведении экспериментальных исследований ЛРД на основе непрерывного оптического разряда использовался лазерный

технологический комплекс (ЛТК) ОАО «Казанское ОКБ «Союз»».

Комплекс состоит из электроразрядного CO_2 -лазера с замкнутым контуром (с конвективным охлаждением) и предназначен для получения инфракрасного лазерного излучения на длине волны $10,6 \text{ [мкм]}$.

Основные технические данные CO_2 -лазера приведены в табл.

Таблица 2 - Основные технические данные CO_2 -лазера

Наименование параметров	Норма
1. Мощность лазерного излучения генератора, кВт номинальная/максимальная	$4 \times 10^3 \text{ Вт} / 15 \times 10^3 \text{ Вт}$
2. Значение относительной нестабильности мощности излучения %, не более	5
3. Значение максимальной нестабильности диаграммы направленности излучения, рад.	5×10^{-3}
4. Тип разряда	Самостоятельно тлеющий газовый разряд
5. Излучатель	С быстрой поперечной прокачкой газовой смеси и резонатором неустойчивого типа
6. Длина волны излучения, мкм	10,6
7. Режим работы генератора	Непрерывный
8. Форма поперечного сечения	Осесимметричное кольцо
9. Объемное соотношение рабочей смеси $\text{CO}_2 + \text{N}_2 + \text{He}$	$0,1 + 0,88 + 0,02$
10. Потребная мощность, кВт	185
11. Напряжение питающей сети, В	$380 / 220 \pm 10\%$
12. Расход рабочей смеси, г/с, не более $\text{CO}_2 + \text{N}_2 + \text{He}$	5
13. Габаритны размеры участка под установку генератора, мм, не более длина/ширина/высота	7500/6000/4000

Лазерный стенд позволяет проводить «огневые» испытания плазмотрона на основе непрерывного оптического разряда.

Анализ изменения абсолютной осевой скорости показывает, что в случае применения осесимметричного противоточного закрученного течения в КП скорость газа в приосевой области после разворота на радиус $R=5.0 \text{ мм}$ до $R=12.5 \text{ мм}$ где скорость обдува НОР, если в данном месте

«поджечь» ОР, составит 1.0-2.0 м/с, что соответствует режиму максимальной температуры ядра плазменного образования, т.е. максимальной скорости истечения рабочего газа из камеры и сопла. При этом скорость бокового обдува плазменного образования на радиусе $R=10$ мм составляет 3.0 м/с, т.е. достаточная для уноса боковой части ядра и его возврата рециркуляционным сечением обратно в камеру, тем самым достигается экономическое использование рабочего газа и высокая температура струи рабочего газа на выходе из камеры поглощения оптического плазмотрона. При дальнейшем увеличении скорости достигается эффект фон Энгеля-Штеенбека, осевая скорость истечения газа максимальная (рис.3).

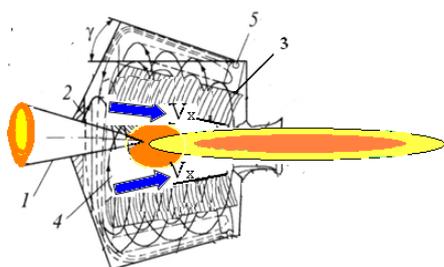


Рис. 3- Схема течения из камеры поглощения оптического плазмотрона в режиме реализации эффекта фон Энгеля Штеенбека: 1 - лазерное излучение; 2 - ГДО; 3 - рециркуляционное течение; 4 - приосевое течение; 5- тангенциальный ввод рабочего тела

Из камеры истекает только высокотемпературное ядро. Таки образом, подбирая место расположения плазменного образования можно добиться максимальной эффективности работы оптического плазмотрона, используя эффект фон Энгеля-Штеенбека.

Проведены работы по нанесению оксида цинка на пластиковую подложку в среде водорода при пониженном давлении. Процесс нанесения покрытий осуществлялся путем воздействия на порошок оксида цинка ZnO оптическим разрядом. Оптический разряд генерировался при интенсивностях лазерного излучения 10^6 Вт/см²- 10^7 Вт/см². Полученный результат представлен на рис.4. Размер наночастиц составляет 100-200нм.

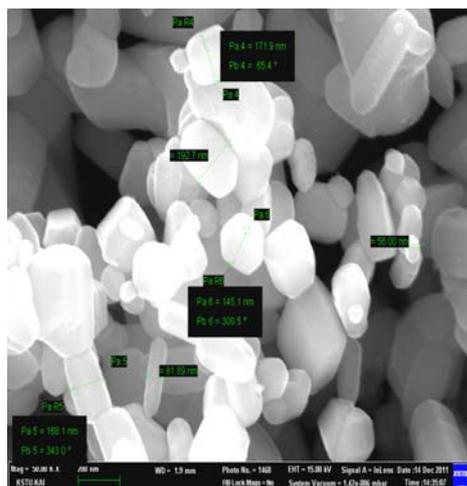


Рис. 4 - АСМ – изображение поверхности покрытия ZnO на пластине из пластика

Выводы

Экспериментально получен и исследован эффект фон Энгеля – Штеенбека применительно к оптическому разряду. Определены режимы оптического плазмотрона, при которых возникает данный эффект. Показано, что применение полученного эффекта в камере поглощения оптического плазмотрона обеспечивает максимальную температуру рабочего газа, истекающего из оптического плазмотрона. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании оптических плазмотронов для резки металлов, для получения и нанесения на поверхность пластика наноструктур оксида цинка ZnO.

Литература

1. Саттаров А.Г. Оптический плазмотрон на основе непрерывного оптического разряда / А.Г. Саттаров, М.Ф. Вахитов // Вестник КГТУ - 2009. - №3. - С. 17-20.
2. 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.
3. Кулумбаев Э.Б., Лелевкин В.М. Непрерывный оптический разряд в закрученном газовом потоке // Физика плазмы. 1999. Т. 25. № 2. С. 205–208.
4. 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.