

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	Длина КП = 30 [мм]	эксперимент	Численный расчет	Длина КП = 37 [мм]	эксперимент	Численный расчет	Длина КП = 47 [мм]	эксперимент	Численный расчет
4.0 [кгс/ см ²]	0,0135	0,0190	0,0130	0,0142	0,0130	0,0142	0,0130	0,0130	0,0142
8.0 [кгс/ см ²]	0,0340	0,0450	0,0312	0,0400	0,0312	0,0400	0,0312	0,0312	0,0400
12.0 [кгс/ см ²]	0,0580	0,0670	0,0520	0,0500	0,0520	0,0500	0,0520	0,0520	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%. Р э, [кгс/см²] Рвх, [кгс/см²] Рис. 1 - График изменения разрежения в зависимости от давления газа на входе Рвх, [кгс/см²], и Lк, [мм] При проведении эксперимента осуществлялось измерение статического давления по длине камеры поглощения. Результаты измерений использовались для верификации принятой модели. На стенке КП модельного оптического плазмотрона, 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 Рвх = 3 кгс/см² 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[кгс/см²]. При выполнении расчетов нами за основу принята модель твердой непроницаемой сферы с температурой в ядре -16 000 К. Радиус сферы принимаем $R=8$ мм, что соответствует реальным размерам плазмы, образованной 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 СО₂-лазера с замкнутым контуром (с конвективным охлаждением) и предназначен для получения инфракрасного лазерного излучения на длине волны 10,6 [мкм]. Основные технические данные СО₂-лазера приведены в табл. Таблица 2 - Основные технические данные СО₂ лазера

Наименование параметров	Норма
1. Мощность лазерного излучения генератора, кВт номинальная/максимальная	4×10 ³ Вт/15×10 ³ 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 СО ₂ +N ₂ +He	0,1+0,88+0,02
10. Потребная мощность, кВт	185
11. Напряжение питающей сети, В	380/220±10%
12. Расход рабочей смеси, г/с	не более СО ₂ +N ₂ +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 $R=5.0$ мм до $R=12.5$ 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. Таким 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 106 Вт/см²-107 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.