

УДК 533.697

Сравнение характеристик сверхзвуковых эжекторов с разными схемами инжекции высоконапорного газа для газовых лазеров с прокачкой рабочей среды

Г. Сингхал¹, П.М.В. Суббарао², Майнуддин³, Р.К. Тьяжи¹, А.Л. Давар¹

¹Научно-технологический лазерный центр, Дели, Индия

²Индийский технологический институт, Дели, Индия

³Университет Джамия Миллия Исламия, Дели, Индия

E-mail: singhal_g@rediffmail.com

Во многих химических газовых лазерах, работающих при низких давлениях генератора потока, используются сверхзвуковые течения с низким давлением газа в рабочей полости; эти лазеры могут быть отнесены к высокопроизводительным системам, допускающим масштабирование до мегаваттных мощностей. К таким лазерам относятся химический кислород-йодистый и водород-фтористый (дейтериево-фтористый) лазеры. Возможность использования перечисленных лазерных систем в различных приложениях увеличивается в случае выпуска вторичного потока непосредственно в окружающую атмосферу. В результате система восстановления давления на основе эжектора образует эффективную конфигурацию для работы устройства в открытом цикле. Считается, что в таких лазерных системах следует использовать по крайней мере две эжекторные ступени — с высоким и низким давлением, из которых ступень с низким давлением является более критической, поскольку она непосредственно обеспечивает увлечение рабочей среды лазера и может приводить к возмущению потока в рабочей полости, которое, если оно имеет место, может оказывать влияние на работу лазера. Следовательно, выбор разумной схемы инжекции эжектирующего потока, именно, периферийной или центральной, представляет собой важную газодинамическую проблему, поэтому представляется весьма полезным экспериментальное параметрическое сравнение рабочих характеристик соответствующих конфигураций эжектора. В настоящей работе поставлена задача экспериментального изучения влияния изменения давления высоконапорного газа, коэффициента эжекции устройства, условий по противодавлению, взаимного расположения инжектирующего сопла и химического кислород-йодистого лазера, а также выявление причин такого влияния.

Ключевые слова: химический кислород-йодистый лазер, сверхзвуковой эжектор, периферийный эжектор, центральный эжектор.

Введение

В прокачных газовых лазерах [1] используются различные газы и/или химические агенты, которые смешиваются и затем пропускаются через область генерации в направлении, перпендикулярном направлению вывода лазерного пучка. Несмотря на некоторые проблемы, такие лазеры остаются первыми среди равных в отношении возможности их

масштабирования до мегаваттных мощностей с учетом превосходного качества пучка и гибкости конструкции. Они являются наиболее востребованными в сфере мощных промышленных излучателей и лазеров для военного применения.

Для генерации излучения и оптимального вывода мощности во всех таких лазерах должны быть реализованы специальные газодинамические условия. Типичные условия в лазерной полости некоторых наиболее мощных лазеров таковы: химический кислород-йодистый лазер (ХКИЛ) [2–4] (с длиной волны $\lambda = 1,315$ мкм): $P_{\text{cavity}} \sim 3$ Торр, $M \sim 2$; водород-фтористый/дейтериево-фтористый лазер (ВФ/ДФЛ) [5] ($\lambda = 2,7\text{--}3,4$ мкм): $P_{\text{cavity}} \sim 5$ Торр, $M \sim 5$; газодинамический CO_2 -лазер [6] ($\lambda = 10,6$ мкм): $P_{\text{cavity}} \sim 35$ Торр, $M \sim 5$; лазер на парах щелочных металлов [7] ($\lambda = 10,6$ мкм): $P_{\text{cavity}} \sim 1\text{--}4$ бар, $M \sim 3$. Первые два типа лазеров относятся к лазерам с низким давлением генератора потока, требующим использования активных систем восстановления давления, таких как сверхзвуковые эжекторы, допускающие непосредственный выброс газовой смеси в атмосферу. В других перечисленных лазерах благодаря высокому давлению в генераторе потока (30–60 бар) могут применяться пассивные устройства восстановления давления, например, сверхзвуковые диффузоры с открытым рабочим циклом.

В последнее время проявляется значительный интерес к изучению различных схем инжекции высоконапорного газа, используемых в эжекторах для создания сверхзвукового потока газовой лазерной среды с низким давлением. В эжекторных системах в основном возможны два режима инжекции высоконапорного газа, соответствующих центральной и периферийной конфигурациям эжектора. Сообщалось об исследованиях, проясняющих эксплуатационные характеристики обеих схем [8–10]. Между тем, для выявления различий в их газодинамическом поведении (что является основным предметом настоящей работы) было бы полезно провести сопоставление этих двух схем, рассчитанных на одну и ту же величину коэффициента эжекции и восстановления давления.

Двойные эжекторные схемы проектировались для работы с ХКИЛ. О разработке компактной системы сверхзвукового ХКИЛ (СХКИЛ) класса мощности 500 Вт с угловым струйным одиночным генератором кислорода (СОГК), в котором в качестве буферного газа использовался азот, сообщалось ранее в работах [11, 12]. Типичная величина полного расхода газовой смеси со среднемолекулярным весом ~ 30 в системе составляла $3 \text{ г}\cdot\text{с}^{-1}$. Рабочая температура и давление генератора были равны ~ 300 К и ~ 25 Торр. В случае ХКИЛ для поддержания течения лазерной среды при низком давлении в полости необходимо использование высокопроизводительных вакуумных систем, что приводит к повышенному отношению вес/мощность. Последнее обстоятельство ограничивает общую работоспособность устройства из-за значительных проблем, связанных с необходимостью обеспечения его транспортабельности.

Система восстановления давления, основанная на использовании эжектора, может применяться в тех случаях, когда необходимо обеспечить непосредственный выпуск истекающих потоков в атмосферу; последняя ситуация имеет место, например, для систем, эксплуатируемых на борту летательных аппаратов. Так, например, для бортового лазера, разработанного в Исследовательской лаборатории военно-воздушных сил США, был выбран подход, основанный на использовании эжектора [13–15]. Подход с применением эжектора для ХКИЛ сопряжен со множеством сложностей, но вопреки многим исследованиям (см. [9, 15, 16]) он использовался для прояснения различных аспектов проблемы и до сих пор является предметом изучения.

Цель настоящей работы — провести экспериментальное сравнение двух инжекторных систем для эжектирующего газового потока. В случае ХКИЛ такое сравнение критически необходимо, особенно с точки зрения использования новейших ОГК-конфигураций [17–19], которые допускают работу с высоким давлением (80–100 Торр) и большим

значением расхода. Такая необходимость имеет место в связи с тем, что обсуждаемые конфигурации до сих пор не подвергались широкому лабораторному тестированию и их оптимизация должна включать варьирование величин расходов используемых газов с тем, чтобы обеспечить достаточную гибкость работы эжектора в рабочем диапазоне устройства.

1. Выбор геометрической конфигурации

Эжектор включает устройство для инъекции в газодинамический тракт эжектирующего потока, который вовлекает в движение увлекаемый (вторичный) поток. За узлом инъекции расположена постепенно сужающаяся смесительная камера, в которой реализуется смешение газов при приблизительно постоянном давлении; безусловно, такое смешение является более эффективным, нежели смешение, которое реализуется в смесительной камере с постоянной площадью сечения. За камерой смешения следует участок постоянного поперечного сечения, который является критическим сечением эжектора и одновременно ассоциируется с генерацией набора лямбда-скачков, также называемых псевдоскачками. За дозвуковым диффузором следует область с постоянной площадью проходного сечения. Такая конфигурация позволяет улучшить восстановление давления и уменьшить динамическое давление выхлопа из эжектора, который в действительности представляет собой источник потерь.

Случай, когда эжектирующий газ инжектируется по центру, а эжектируемый поток увлекается на периферии, называется случаем центральной инъекции (см. рис. 1). Обратный случай расположения потоков соответствует периферийной инъекции, что иллюстрируется вставкой на рис. 1.

Для описания геометрии эжектора любого типа могут быть использованы интегральные уравнения динамики текучей среды [9]. Соответствующая система уравнений представляет собой набор одномерных уравнений Навье–Стокса, которые надлежит решать вместе с уравнением состояния газа. Эжекторы двух указанных конфигураций были спроектированы для идентичных условий, а именно для увлекаемого (эжектируемого) потока лазерно-активной среды с расходом $3 \text{ г}\cdot\text{с}^{-1}$. Давление в камере смешения составляло 4 Торр, полное давление и температура лазерного газа — соответственно 5 Торр и 400 К. Коэффициент эжекции w (отношение расходов вторичного и первичного потоков) составлял 0,025, а коэффициент нерасчетности эжектора z (отношение давлений торможения эжектируемого и эжектирующего газов) — 300 при полной температуре эжектирующего газа 300 К. Целевое значение результирующего отношения коэффициентов восстановления давления в эжекторе принималось равным 18.

Вычисленные значения газодинамических и геометрических параметров для эжекторов обоих типов приведены в табл. I. Для расчета их рабочих характеристик авторами применялась двумерная формулировка задачи о вязком осесимметричном течении с использованием $k-\varepsilon$ модели турбулентности. Расчеты были реализованы в пакете Fluent [20].

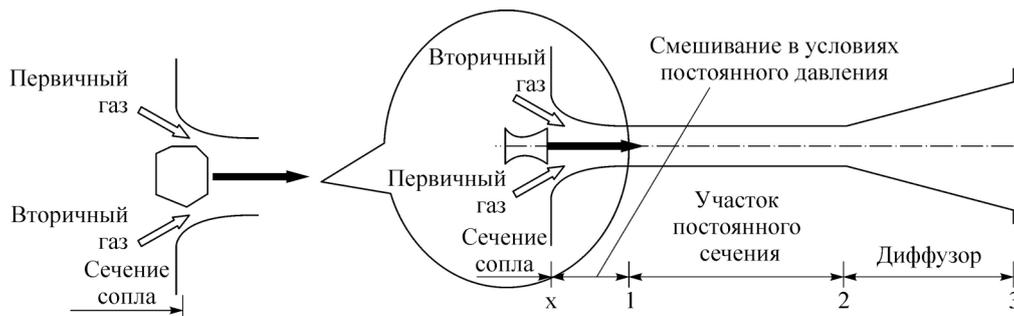


Рис. 1. Типичная геометрия эжектора.

Таблица 1

Газодинамические и геометрические параметры эжектора

| | | | |
|----------------------------|----------------------|---|--|
| Газодинамические параметры | | Расход эжектирующего газа (m'), г·с ⁻¹ | 120 |
| | | Давление торможения эжектирующего газа (p'_0) | $2 \cdot 10^5$ Па (\approx 1520 Торр) |
| | | Число Маха эжектирующего потока (M_i) | 4,72 |
| | | Число Маха смеси газов (M_m) | 4,33 |
| | | Статическое давление за ударной волной | 9333 Па (\approx 70 Торр) |
| | | Давление торможения за ударной волной | 10667 Па (\approx 80 Торр) |
| Геометрические параметры | Центральный эжектор | Диаметр критического сечения сопла, мм | 20 |
| | | Диаметр сечения инжекции эжектирующего потока, мм | 89 |
| | | Длина сопла, мм | 135 |
| | Периферийный эжектор | Зазор критического сечения, мм | 0,85 |
| | | Диаметр области инжекции эжектируемого газа, мм (определяется выходом из полости) | 75 |
| | | Длина диска сопла, мм | 90 |

Для моделирования использовалась программа, применяемая для расчета сжимаемых течений с быстро меняющимися характеристиками, вычисления осуществлялись посредством решения уравнений Навье–Стокса. Использовался предложенный в работе [21] вариант алгоритма SIMPLE (Semi-Implicit Procedure for Pressure linked Equations — полунейная схема для уравнений со связью посредством давления) для течений сжимаемой среды. Входное сечение для потока высоконапорного газа задавалось как граница с некоторым входным значением давления. Входное сечение для лазерного газа представляло собой границу с некоторым значением массового расхода. Выходное сечение эжектора представляло собой границу с заданной величиной давления. На стенках использовалось условие прилипания, предполагавшее равенство нулю (благодаря эффектам вязкости) r - и z -компонент скорости, а ось эжектора представляла собой сдвиговую границу с нулевыми значениями градиентов всех величин поперек оси симметрии. Характеристики течения вычислялись в различных точках эжектора и в его выходном сечении с использованием указанных граничных условий для критерия сходимости 10^{-5} кг·с⁻¹ уравнения неразрывности.

2. Детали эксперимента

Полный расход лазерной среды в ХКИЛ, равный приблизительно $3 \text{ г} \cdot \text{с}^{-1}$, обеспечивался подачей газа от углового одиночного кислородного генератора, а также нагнетательного и йодного инжекторов; эти газы поступали в сверхзвуковое сопло и далее в лазерную полость с размерами выходного сечения $75 \times 24 \text{ мм}^2$. Длина, на которой осуществлялось усиление мощности излучения в полости, располагалась на расстоянии 75 мм от места инжекции йода. Лазерный газ подавался по отдельному газопроводу с помощью электрического регулятора давления и электромагнитного клапана с запорными отверстиями.

Система подачи высоконапорного газа обеспечивала его поступление с расходом $5 \text{ кг} \cdot \text{с}^{-1}$; она включала батарею из 50 газовых баллонов общим объемом 7 куб. м. с давлением 150 бар. Поток управлялся регулятором давления в камере управляющего клапана (M/s Thompson, модель K05, 0–172 бар) и далее набором электрически управляемых регуляторов давления (модель SMC, 0–10 бар), а также при помощи электромагнитных клапанов, которые служили для точного задания последовательности и контроля газового потока.

Экспериментальные данные были получены с применением нескольких сенсоров давления, размещенных вдоль оси эжектора. С помощью этих сенсоров можно было измерять давление в сердцевине течения и в лазерной полости (как статическое, так и полное), давление в нагнетательной камере, в модуле инжекции йода, и в ОГК. Сенсоры давления фирмы M/s Metran (модели 2020 и 2040), подключенные к системе сбора данных [22, 23], использовались для измерения давления в режиме реального времени с точностью $\pm 0,1$ Торр.

Для тестирования модуль ХКИЛ вместе с эжектором был интегрирован с вакуумированной емкостью для сброса газа объемом 150 м^3 . Достигавшееся на практике давление восстановления эжектора определялось посредством его измерения в этой емкости. Емкость была составлена из шести танков объемом 25 м^3 каждый, соединенных таким образом, чтобы получить необходимую величину вакуумированного объема, и подсоединенных к вакуумной системе, обеспечивавшей скорость откачки $4500 \text{ м}^3 \cdot \text{час}^{-1}$. Выход эжектора подсоединялся к емкости для сброса газа с помощью трубопровода 400NB (400 — условный диаметр).

Экспериментальная процедура включала предварительное получение требуемого давления в емкости для сброса газа. Поскольку расход в проводимых экспериментах составлял $\sim 150 \text{ г} \cdot \text{с}^{-1}$, увеличение давления в емкости при включении откачки было незначительным. Кроме того, поскольку ХКИЛ представлял собой лазер, работающий в непрерывном режиме, основной упор делался на определение характеристик эжектора в установившемся режиме его работы для обеих конфигураций, а не на изучение работы устройств в критических режимах типа запуска.

Во время экспериментов производилось надлежащее задание цикла работы эжектора и подачи потоков. Обычно эжектор запускался за $0,5 \text{ с}$ до инициации потока в лазерной полости. Это делалось для стабилизации сверхзвукового поля скоростей внутри камеры смешения эжектора с низким давлением перед началом формирования течения лазерной среды. Подобным же образом в момент окончания пуска поток эжектирующего газа прерывался за $0,5 \text{ с}$ после завершения течения лазерной среды. Такая последовательность позволяла осуществлять функционирование лазерной полости с преобладанием установившейся работы эжектора. Далее продолжительность тестовых запусков устанавливалась в соответствии с типичным временем работы лазера, которое обычно составляло $4\text{--}5 \text{ с}$.

3. Экспериментальные результаты

Газодинамическое поведение и рабочие характеристики обеих конфигураций эжектора были определены для различных экспериментальных рабочих условий, которые обсуждаются ниже.

Вариации статического давления при расчетных условиях

Экспериментально полученные графики изменения статического давления для двух конфигураций эжектора показаны на рис. 2. Типичные экспериментально наблюдавшиеся величины давления восстановления для периферийной и центральной конфигураций устройства при расчетных рабочих условиях близки соответственно к 63 и 62 Торр ($1 \text{ Торр} = 0,133 \text{ кПа}$).

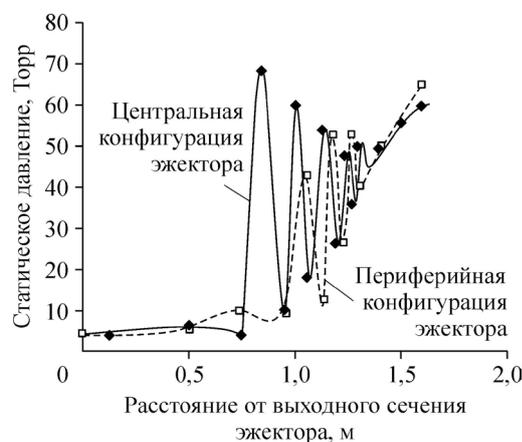


Рис. 2. Экспериментально наблюдаемые изменения статического давления вдоль оси эжектора.

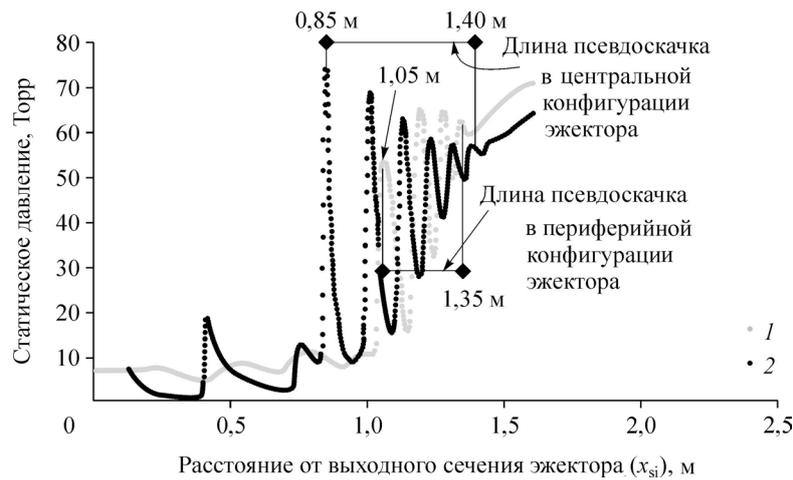


Рис. 3. Численно предсказанные вариации статического давления вдоль оси эжектора. Расчетные характеристики эжектора для различных конфигураций: периферийной (1) и центральной (2).

Численные результаты, иллюстрирующие изменение статического давления вдоль оси эжектора в двух рассмотренных случаях, приведены на рис. 3. Видно, что в обоих случаях экспериментальные результаты находятся в близком соответствии с расчетными данными. Типичные изменения амплитуд рассчитанных и наблюдавшихся пиков давления составляли 7 %. Среднее рассчитанное давление восстановления варьировало в пределах 9 и 7 % для периферийной и центральной конфигураций эжектора соответственно.

Очевидно, что структура скачка сжатия в сверхзвуковых течениях в канале, и в особенности в течении со смещением, имеющим место в эжекторах, сильно отличается от плоского разрыва. Разница обусловлена взаимодействием ударной волны с пограничным слоем, которое приводит к формированию так называемой области псевдоскачка. Тем самым подразумевается, что имеет место сильное взаимодействие ударной волны со сдвиговыми слоями, формирующимися на стенках канала. Таким образом, вместо идеального плоского разрыва мы имеем серию более слабых ударных волн, расстояние между которыми уменьшается в направлении к сердцевине течения, как это показано на рис. 2 и 3.

Из рис. 2 и 3 видно, что рассчитанная структура псевдоскачка для двух конфигураций хотя и является качественно подобной, проявляет несколько заметных отличий. Основное отличие состоит в том, что численно рассчитанные пики давления в случае центральной конфигурации эжектора являются более интенсивными и демонстрируют более раннее формирование псевдоразрыва (x_{si} при $\sim 0,8$ м против $\sim 1,05$ м), в то время как сам псевдоразрыв является более протяженным ($L_{ps} \sim 0,55$ м против $\sim 0,3$ м), причем рассчитанное статическое давление на выходе имеет несколько меньшее значение (давление P_b равно ~ 68 Торр против ~ 70 Торр).

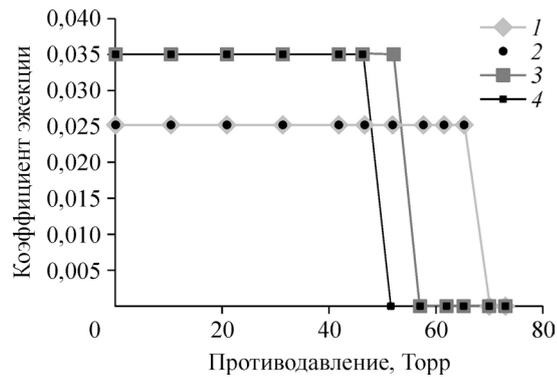
Все эти особенности можно объяснить присутствием течения эжектированной среды с низкими импульсом и энергией, приводящим к формированию более толстого пограничного слоя в случае центральной конфигурации эжектора. В противоположность этому, в периферийной конфигурации течение с большей энергией и более высоким числом Рейнольдса расположено ближе к стенке, и оно, возможно, лучше аккомодирует обратный градиент давления; при этом подавленные эффекты пограничного слоя задерживают формирование псевдоскачка. Поведение скачка, наблюдавшееся в эксперименте, хорошо согласуется с поведением, полученным в результате численных расчетов.

Влияние коэффициента эжекции

Коэффициент эжекции (w), который определяется как отношение расходов вторичного и первичного газовых потоков, представляет собой одну из важнейших характеристик

Рис. 4. Влияние коэффициента эжекции на величину давления восстановления при расходе высоконапорного газа $120 \text{ г}\cdot\text{с}^{-1}$.

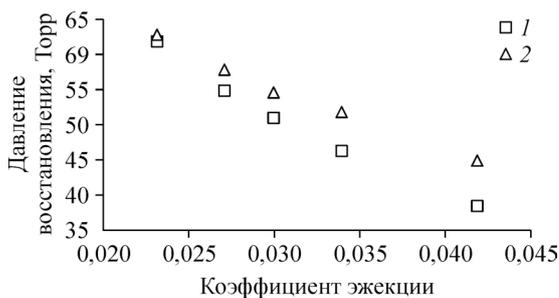
Расход эжектируемого газа: $3 \text{ г}\cdot\text{с}^{-1}$ (1) и $4,5 \text{ г}\cdot\text{с}^{-1}$ (2); коэффициент эжекции: для расчетных условий для периферийной (1) и центральной (2) конфигураций; для нерасчетных условий для периферийной (3) и центральной (4) конфигураций.



эжектора. Авторами были выполнены эксперименты по выявлению влияния изменения этого коэффициента на величину давления восстановления устройства. Указанное изменение достигалось варьированием расхода подсосывающего потока в диапазоне $3\text{--}5 \text{ г}\cdot\text{см}^{-1}$ при неизменном расходе высоконапорного газа. Полученные данные для расчетной величины коэффициента эжекции ($\sim 0,025$) и нерасчетной величины этого коэффициента ($\sim 0,035$) показаны на рис. 4. Было найдено, что расчетный режим работы обеих эжекторных конфигураций осуществляется при приблизительно идентичных условиях. Однако для нерасчетных условий при более высоких значениях вторичного (лазерного) потока периферийная конфигурация эжектора демонстрирует лучшие рабочие характеристики. Это происходит из-за того, что для данной конфигурации характерна большая величина давления срыва, определяемая точкой срыва режима, в которой имеет место резкое падение коэффициента эжекции, а именно: 52 Торр по сравнению с 47 Торр для центральной конфигурации с нерасчетным значением $w \sim 0,035$. Резкое уменьшение коэффициента эжекции происходит из-за сдвига рабочего режима эжектора из сверхзвуковой в смешанную область, в которой все течение оказывается дозвуковым.

На рис. 5 приведено сопоставление рабочих характеристик двух конфигураций эжектора при его функционировании в точке срыва режима (сверхзвуковой режим) при различных величинах коэффициента эжекции и при типичных расходах эжектирующего потока $\sim 120 \text{ г}\cdot\text{с}^{-1}$. Для обеих конфигураций наблюдалось уменьшение давления восстановления при больших значениях коэффициента эжекции. Однако было получено, что уменьшение величины давления восстановления для центральной конфигурации эжектора являлось более выраженным по сравнению с периферийной конфигурацией. Как отмечалось в работе [24], в эжекторах имеет место три типа потерь, а именно: потери, связанные со смешиванием потоков, потери, обусловленные градиентом кинетической энергии, и потери, вызванные ударной волной. Считается, что в случае центральной конфигурации эжектора свободное расширение струи высоконапорного газа приводит к большей величине числа Маха газового потока, в котором формируется плотное заграждение течения, и возникают повышенные значения градиентов кинетической энергии. Все это приводит к увеличению потерь давления, приходящихся на достижение больших значений коэффициента эжекции по мере того как псевдоскачок смещается вверх по течению в сторону камеры смешения; это, очевидно, является причиной различия в поведении периферийной и центральной конфигураций эжектора. Последнее, кроме того, подтверждается численными данными, которые приведены на рис. 6. Здесь можно отметить две особенности: во-первых, количество

эжектора при его функционировании в точке срыва режима (сверхзвуковой режим) при различных величинах коэффициента эжекции и при типичных расходах эжектирующего потока $\sim 120 \text{ г}\cdot\text{с}^{-1}$. Для обеих конфигураций наблюдалось уменьшение давления восстановления при больших значениях коэффициента эжекции. Однако было получено, что уменьшение величины давления восстановления для центральной конфигурации эжектора являлось более выраженным по сравнению с периферийной конфигурацией. Как отмечалось в работе [24], в эжекторах имеет место три типа потерь, а именно: потери, связанные со смешиванием потоков, потери, обусловленные градиентом кинетической энергии, и потери, вызванные ударной волной. Считается, что в случае центральной конфигурации эжектора свободное расширение струи высоконапорного газа приводит к большей величине числа Маха газового потока, в котором формируется плотное заграждение течения, и возникают повышенные значения градиентов кинетической энергии. Все это приводит к увеличению потерь давления, приходящихся на достижение больших значений коэффициента эжекции по мере того как псевдоскачок смещается вверх по течению в сторону камеры смешения; это, очевидно, является причиной различия в поведении периферийной и центральной конфигураций эжектора. Последнее, кроме того, подтверждается численными данными, которые приведены на рис. 6. Здесь можно отметить две особенности: во-первых, количество



эжектора. Последнее, кроме того, подтверждается численными данными, которые приведены на рис. 6. Здесь можно отметить две особенности: во-первых, количество

Рис. 5. Изменение давления восстановления в зависимости от коэффициента эжекции. Центральная (1) и периферийная (2) конфигурации эжектора.

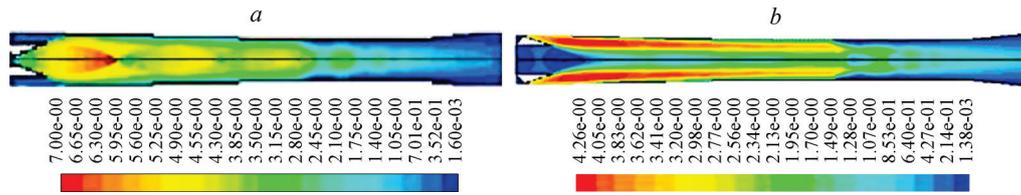


Рис. 6. Изолинии числа Маха вдоль оси эжектора. Центральная (а) и периферийная (b) конфигурации эжектора.

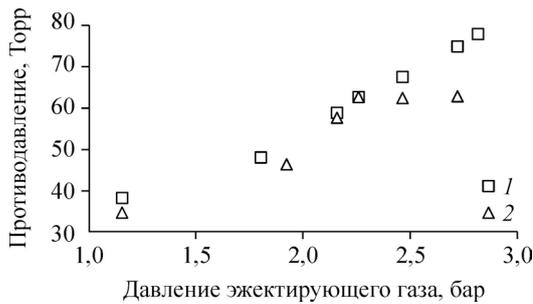
ячеек в переходной области течения, которую можно идентифицировать как отсасываемую часть потока, является гораздо меньшим для центральной конфигурации эжектора в сравнении с периферийной конфигурацией, во-вторых, число Маха в центральной области ядра течения является значительно более высоким для центральной конфигурации ($M \sim 6,5$) в сопоставлении со значением для периферийной конфигурации ($M \sim 4,25$). По-видимому, причиной этому является то обстоятельство, что в случае центральной конфигурации пристенная текучая среда с малым значением момента и энергии не может противодействовать практически свободному расширению высоконапорного потока, что и приводит к большим значениям числа Маха.

Таким образом, в случае центральной конфигурации эжектора запираение Фабри или аэродинамическое запираение для отсасываемой части потока является более плотным по сравнению с периферийной конфигурацией эжектора со значительным градиентом кинетической энергии. Это приводит к более высокому значению коэффициента эжекции для контролируемого режима, которое достигается за счет меньшего значения давления восстановления. При увеличении расхода величина восстановления давления для периферийной конфигурации возрастает на 5–15 %.

Влияние величины расхода эжектирующего газа

Также были проведены эксперименты для двух конфигураций эжектора с тем, чтобы проанализировать влияние увеличения расхода эжектирующего газа на противодавление восстановления (см. рис. 7). Видно, что рабочая точка экспериментального эжектора для обеих конфигураций лежит немного выше напорного давления эжектирующего газа (2,2 бар) из-за потерь давления на входе канала эжектирующего потока, хотя типичные значения расхода поддерживались на уровне $120 \text{ г}\cdot\text{с}^{-1}$. Экспериментально можно было наблюдать, что давление восстановления в случае периферийного эжектора не улучшалось за расчетной точкой даже при дальнейшем увеличении давления нагнетания эжектирующего газа.

Обнаруженное различие в газодинамическом поведении двух конфигураций эжектора может быть объяснено при анализе численного результата для скачка в двух конфигурациях эжектора при противодавлении 10 кПа (75 Торр) (см. рис. 8). В случае центральной конфигурации эжектора псевдоскачок во время разрушения режима еще располагается внутри камеры смещения (см. рис. 8a). Однако в случае периферийной конфигурации эжектора в камере смещения устанавливается сильный скачок уплотнения (см. рис. 8b).



Таким образом, увеличение давления эжектирующего газа в центральной конфигурации эжектора действительно приводит к сдвигу псевдоскачка обратно

Рис. 7. Изменение противодавления восстановления с величиной давления подачи эжектирующего газа. Центральная (1) и периферийная (2) конфигурации эжектора.

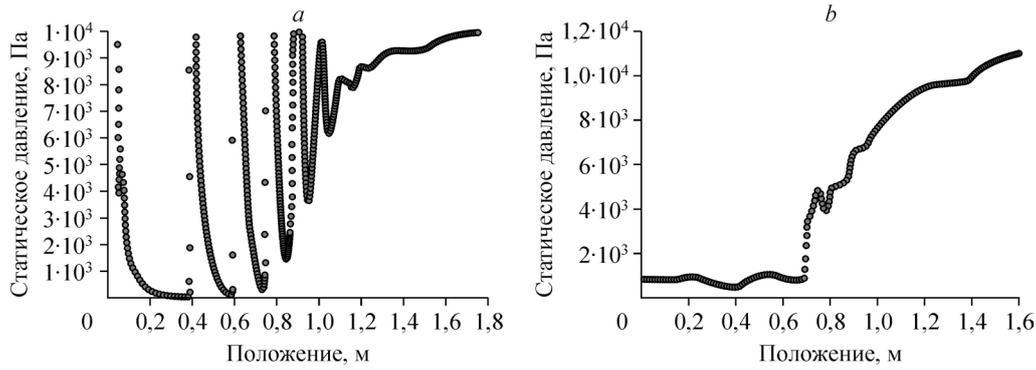


Рис. 8. Изменение статического давления вдоль оси эжектора при величине противодавления 10 кПа. Центральная (а) и периферийная (б) конфигурации.

в область канала с постоянным сечением, тем самым восстанавливая картину сверхзвукового потока со смешением, которая обеспечивает желаемое функционирование эжектора.

Влияние изменения положения сопла эжектирующего газа

Для обеих конфигураций эжектора проводилась оценка влияния изменения положения сопла относительно входа в камеру смешения. Полученные результаты представлены на рис. 9. Очевидно, что рабочие характеристики эжектора в терминах давления восстановления ухудшаются по мере удаления сопла эжектирующего газа от входа в камеру смешения. Это происходит потому, что по мере такого удаления оба потока, эжектирующий и эжектируемый, очевидно, претерпевают смешение в потоке постоянного сечения, а не смешение в условиях постоянного давления, которое приводит к падению общей работоспособности устройства. Большая величина падения давления восстановления для периферийной конфигурации имеет место из-за больших, в сопоставлении с центральной конфигурацией, потерь кинетической энергии эжектирующего газа при его контакте со стенками внутреннего и внешнего обрамлений перед смешением с эжектируемым потоком.

Условия в лазерной камере ХКИЛ

Поскольку основной целью настоящей работы являлась проверка функционирования сверхзвукового ХКИЛ, было важно оценить рабочие характеристики системы относительно условий, реализуемых в полости лазера. На рис. 10 показаны условия в полости лазера по результатам измерения статического и полного давлений для расчетной величины противодавления в эжекторе, равной ~ 62 Торр. Графики оказались почти идентичны для расчетных условий, так что показанные зависимости для каждого из двух случаев совпадают, поэтому показаны только две характерные зависимости: для $P_{\text{cavity}} \sim 3,2$ Торр и $P_{\text{Pitot}} \sim 9,5$ Торр. Условия по

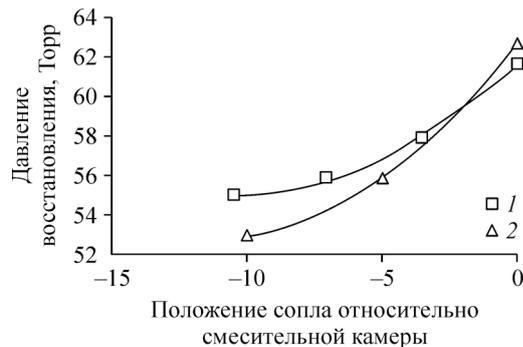


Рис. 9. График изменения величины давления восстановления с изменением положения выхода из сопла относительно входа в камеру смешения. Центральная (1) и периферийная (2) конфигурации эжектора.

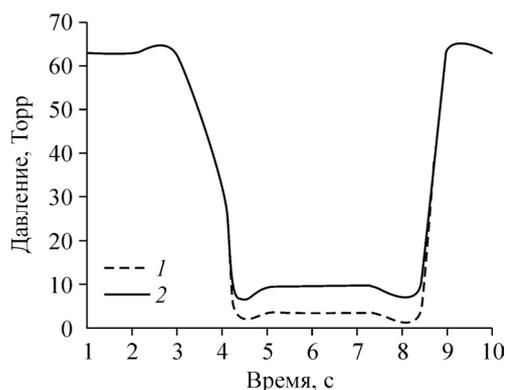


Рис. 10. Изменения во времени давления в полости (1) и полного давления (2) для расчетной величины противодействия 62 Торр для обеих конфигураций эжектора.

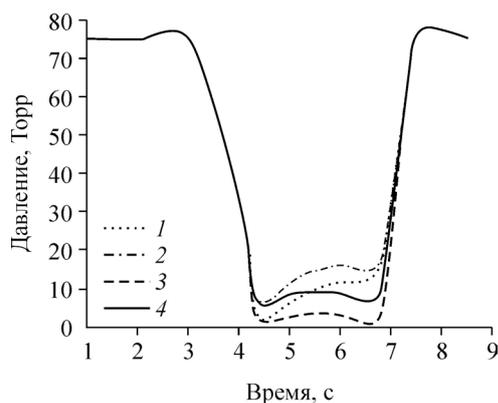


Рис. 11. Изменения во времени давления в полости (1, 3) и полного давления (2, 4) для нерасчетной величины противодействия 75 Торр для обеих конфигураций эжектора. Периферийная (1, 2) и центральная (3, 4) конфигурации.

противодавлению определялись условиями внутри вакуумной полости для сброса газа объемом 150 куб.м., которая подвергалась одновременной откачке насосами с производительностью $4500 \text{ м}^3 \cdot \text{час}^{-1}$, обеспечивавшими полный максимальный отбор газа величиной $\sim 150 \text{ г} \cdot \text{с}^{-1}$ (при напорном давлении 2,85 бар).

Временные зависимости для двух конфигураций эжектора, полученные в коротких запусках устройства продолжительностью 3,5 с при нерасчетных рабочих условиях с величиной противодействия ~ 75 Торр для лучшей конфигурации (то есть при $x = 0$) с типичными величинами расхода эжектируемого газа ($3 \text{ г} \cdot \text{см}^{-1}$) и более высокими расходами эжектирующего газа, соответствующими нагнетающему давлению 2,85 бар, показаны на рис. 11.

Очевидно, что центральная конфигурация эжектора обеспечивает лучшие показатели в терминах давления среды в полости лазера и числа Маха потока ($M \sim 1,4$ для измеренного полного давления $\sim 9,5$ Торр) по сравнению с периферийной конфигурацией эжектора, для которой наблюдалось устойчивое возрастание давления в полости лазера и полного давления.

Выводы

Благодаря своим преимуществам химические газовые лазеры представляют собой современные лазерные системы и находят широкое применение в промышленных и военных отраслях. В настоящей публикации обсуждаются экспериментальные данные по возможности в сочетании с результатами расчетов сверхзвуковых эжекторных систем с двумя способами инъекции высоконапорного газа — центральной и периферийной — для сравнения их рабочих характеристик. На расчетных режимах использование обеих конфигураций дает идентичные результаты, однако на нерасчетных режимах наблюдается ускоренное уменьшение давления восстановления при использовании центральной конфигурации по сравнению с периферийной конфигурацией. Поведение псевдоскачка оказалось более ярким в случае центральной конфигурации эжектора; оно сохранялось и при более высоких величинах противодействия, где приводило к более высоким значениям давления восстановления на нерасчетных режимах с малым значением коэффициента эжекции.

Таблица 2

Сравнение двух конфигураций эжектора

| Условия работы | Периферийная конфигурация | Центральная конфигурация |
|--|--|--|
| Расчетный режим работы | Противодавление восстановления, ~ 63 Торр | Противодавление восстановления, ~ 62 Торр |
| Нерасчетный режим работы: 1) высокий коэффициент эжекции; 2) низкий коэффициент эжекции. | Длина псевдоскачка, ~ 0,3 м: 1) обеспечивается лучшая величина давления восстановления; 2) не наблюдается заметных улучшений значения давления восстановления, срыв является весьма резким (при давлении 63 Торр). | Длина псевдоскачка, ~ 0,55 м: 1) давление восстановления уменьшается с увеличением коэффициента эжекции; 2) срыв не столь резок и наблюдается улучшение величины давления восстановления (с максимум в 75 Торр). |
| Изменение расположения сопла | Более значительное уменьшение давления восстановления при удалении сопла высоконапорного газа от входа в смесительную камеру. | Давление восстановления уменьшается при удалении сопла высоконапорного газа от входа в камеру смешения. |

Сравнение двух конфигураций эжектора, а именно, периферийной и центральной, с учетом их особенностей, дано в табл. 2.

Можно заключить, что обе конфигурации эжектора (периферийная и центральная схемы) работоспособны с точки зрения эжектирования различных лазерных сред, если параметры (состав) лазерной среды предварительно оптимизированы. Однако в их работе возникают некоторые особенности (с точки зрения достижения более высоких коэффициентов эжекции) в тех случаях, когда лазер (источник пассивного газа) и эжектор оптимизируются вместе. Для достижения оптимальной работы лазера может потребоваться подавление некоторых кинетических процессов, происходящих в лазерном газе и снижающих инверсию в среде, что достигается изменением состава газа и количества разбавителя (инертного газа — гелия или азота). Тогда, если геометрия эжектора, спроектированного одновременно с лазером, остается неизменной, его периферийная схема представляется более предпочтительной, так как она менее чувствительна к варьированию параметров лазерной среды (т.е. изменению молекулярного веса и температуры), когда в лазерном газе варьируется количество разбавителя (инертного газа — гелия или азота). При экспериментальной доводке требуется оптимизация технологически обновленной конфигурации лазера.

Список литературы

1. Carroll D.L. Overview of high energy lasers: past, present and future // AIAA paper. 2011. No. 2011-3102.
2. McDermott W.E., Pchelkin N.R., Benard D.J., Bousek R.R. An electronic transition chemical laser // Applied Physics Letter. 1978. Vol. 32. P. 469-470.
3. Rybalkin V., Katz A., Barmashenko B.D., Rosenwaks S. Nearly attaining the theoretical efficiency of supersonic chemical oxygen-iodine lasers // Applied Physics Letter. 2004. Vol. 85. P. 5851-5853.
4. Kodymova J. Overview on the chemical oxygen-iodine laser technology // SPIE. 2007. Vol. 6346.
5. Rebore V.K., Fedorov I.A., Maksimov Yu.P., Mitryaev V.A., Tretyakov N.E., Etsina A.L. Optimization of characteristics of a CW chemical HF laser with a new method of oxidizing gas production // Proc. XVII Int. Symp. on Gas Flow and Chemical Laser, Lisbon, Portugal, September 15-19, 2008. SPIE. 2008. Vol. 7. P. 131.
6. Anderson J.D.Jr. Gas dynamic lasers: theory, experiment and state of the art // Maryland University, Report prepared for Airforce Office of Scientific Research (AFOSR), 1974.
7. Barmashenko B.D., Rosenwaks S. Feasibility of supersonic diode pumped alkali lasers: model calculation // Applied Physics Letters. 2013. Vol. 201, Iss. 14. P. 141108-1-141108-4.
8. Singhal G., Rajesh R., Mainuddin, Dawar A.L., Subbarao P.M.V., Endo M. Two-stage ejector based pressure recovery system for small scale SCOLL. Experimental Thermal and Fluid Science. 2006. Vol. 30, No. 5. P. 415-426.
9. Malkov V.M., Kiselev I.A., Orlov I.A., Shatalov A.E. Improving of flow optical quality in COIL resonator cavity as result of operation of pressure recovery system developed on base of active diffuser // Proc. SPIE. 2010. Vol. 7751, article id. 77510Q. 6 p.
10. Singhal G., Mainuddin, Tyagi R.K., Dawar A.L., Subbarao P.M.V. Pressure recovery studies on a supersonic COIL with central ejector configuration // Optics and Laser Technology. 2010. Vol. 42. P. 1145-1153.

11. Tyagi R.K., Rajesh R., Singhal G., Mainuddin, Dawar A.L., Endo M. Design and realization of a 500W class jet type singlet oxygen generator with angular exit // Proc. SPIE. 2003. Vol. 4971–02. 11 p.
12. Tyagi R.K., Rajesh R., Singhal G., Mainuddin, Dawar A.L., Endo M. Parametric studies of a supersonic COIL with angular jet singlet oxygen generator // Infrared Physics and Technology. 2003. Vol. 44. P. 271–279.
13. Lamberson S.E. The airborne laser // Proc. SPIE. 2002. Vol. 4760. 9 p.
14. Lamberson S.E., Schall H., Shattuck P. The airborne laser // Proc. SPIE. 2007. Vol. 6346. 9 p.
15. Boreysho A.S., Malkov V.M., Savin AV. High-power supersonic chemical lasers: gas dynamic problems of operation of mobile systems with PRS // Proc. SPIE. 2008. Vol. 7131.
16. Борейшо А.С., Малков В.М., Савин А.В. Химический кислород-йодный лазер: аэрооптика и газодинамика // Инж.-физ. журн. 2011. Т. 84, № 1. С. 57–73.
17. Zagidullin M.V., Nikolaev V.D., Svistun M.I., Khvatov N.A. Centrifugal bubble $O_2(^1\Delta)$ gas generator with a total pressure of 100 Torr // Quantum Electronics. 2008. Vol. 38, No. 8. P. 794–800.
18. Jirasek V., Censky M., Spalek O., Kodymova J. High pressure generator of singlet oxygen // Chemical Engng and Technology. 2013. Vol. 36, No. 10. P. 1755–1763.
19. Hewett K.B. Singlet oxygen generators — the heart of chemical oxygen iodine lasers: past, present and future // Proc. SPIE. 2009. Vol. 7131. P. 713101.
20. FLUENT Users' Manuals version 5.1, Fluent India, 2003.
21. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. М.: Энергоатомиздат, 1984. 152 с.
22. Mainuddin, Tyagi R.K., Rajesh R., Singhal G., Dawar A.L. Real time data acquisition and control system (DACS) for chemical oxygen iodine laser (COIL) // J. of Measurement Sci. and Technology. 2003. Vol. 14. P. 1364–1372.
23. Mainuddin, Singhal G., Tyagi R.K., Maini A.K. Diagnostics and data acquisition for chemical oxygen iodine laser // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2012. Vol. 61. P. 1747–1756.
24. Kumar V., Singhal G., Subbarao P.M.V. Study of supersonic flow in a onstant rate of momentum change (CRMC) ejector with frictional effects // Applied Thermal Engng. 2013. Vol. 60. P. 61–71.

*Статья поступила в редакцию 7 декабря 2015 г.,
после доработки — 3 февраля 2016 г.*