

УДК 621.3:533.697

## Система восстановления давления химического кислородно-йодного лазера на базе активного диффузора

В.М. Мальков<sup>1</sup>, И.А. Киселев<sup>2</sup>, А.Е. Орлов<sup>2</sup>, И.В. Шаталов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>НПП «Адвент», Санкт-Петербург

<sup>2</sup>НПП «Лазерные системы», Санкт-Петербург

E-mail: shatalov@lsystems.ru, orlov@lsystems.ru

Разработана и создана система восстановления давления открытого типа для химического кислородно-йодного лазера. В качестве первой ступени использовался активный диффузор с подачей эжектирующего газа через сопла, расположенные по периферии канала, второй ступенью служит сверхзвуковой эжектор. Представлены данные численного моделирования вязкого турбулентного потока с теплоподводом в газодинамическом тракте активного диффузора и результаты экспериментального исследования его работы на модельном стенде с вакуумной камерой. Полученные данные использовались при проектировании натурной установки с выхлопом лазерного газа в атмосферу, что позволило оптимизировать параметры установки и значительно улучшить ее массогабаритные характеристики. Особое внимание уделено согласованию параметров и синхронизации запуска лазера и элементов системы восстановления давления.

**Ключевые слова:** сверхзвуковой химический лазер, система восстановления давления, диффузор, эжектор, эксперимент, численное моделирование.

### ВВЕДЕНИЕ

Химические кислородно-йодные лазеры (ХКЙЛ), обеспечивая высокую энергетическую эффективность и хорошее оптическое качество луча, остаются одними из самых перспективных источников лазерного излучения большой мощности для практического использования. Излучение такого лазера на длине волны  $\lambda = 1,315$  мкм находится в окне спектральной прозрачности атмосферы, а также соответствует рабочему диапазону серийно выпускаемых оптических световодов с малыми потерями. Использование такого лазера для решения специальных или технологических задач часто предполагает размещение его на мобильном носителе, т. е. создание мобильного лазерного комплекса.

Для работы химического кислородно-йодного лазера необходимо обеспечить статическое давление в резонансной полости  $p = 3-5$  Торр при числе Маха потока лазерного газа  $M \approx 2$ ; энергии такого потока не хватает для того, чтобы организовать выхлоп в атмосферу отработанной лазерной смеси только с помощью пассивного диффузора (как это делалось, например, в случае газодинамических лазеров). Поэтому практическая реализация лазерного модуля на базе непрерывного ХКЙЛ, работающего по открытому циклу, требует решения проблемы выхлопа.

Для сверхзвуковых химических лазеров — СХЛ (к ним относят ХКЙЛ и HF/DF лазеры) необходима разработка специальных систем восстановления давления (СВД) [1–6]. Выхлоп для ХКЙЛ с относительно небольшим расходом можно организовать также с помощью криосорбционной системы [7]. Но непрерывная работа мощного лазера по замкнутому циклу в течение достаточно продолжительного времени (100–200 с) требует криосорбционной системы (вакуумных емкостей) очень больших размеров, исключающих возможность их использования в мобильных системах. Поэтому для лазера большой мощности, размещенного на самолете [1], используется система восстановления давления эжекторного типа. Правда, в работе [1] выхлоп происходит в среду с пониженным давлением (самолет находится на большой высоте) и для эвакуации лазерного газа достаточно СВД на основе пассивного диффузора и одноступенчатого эжектора. Подобные одноступенчатые системы успешно работают в составе комплексов на базе HF/DF лазеров [3–5].

В случае мобильного лазерного комплекса наземного базирования на основе ХКЙЛ потребная степень сжатия  $\varepsilon$  (отношение давления в окружающем пространстве (атмосфере)  $p_\infty$  к полному давлению  $p_0$  в потоке после диффузора) для СВД достигает значений 40–60, и для восстановления давления требуется уже двухступенчатый эжектор, что приводит к резкому снижению общего коэффициента эжекции  $n$  (отношения расходов лазерного и эжектирующего газов) и еще больше увеличивает длину СВД. Кроме отмеченных больших габаритов и невысокого  $n$  недостатком такого устройства являются трудности при запуске газодинамического тракта, связанные с согласованием газодинамических характеристик ступеней, которые возрастают при увеличении их количества.

Понятно, что оптимизация СВД играет важную роль при проектировании мобильных лазерных комплексов, т. к. именно СВД с запасами компонентов вносит значительный вклад в массогабаритные характеристики комплекса.

## 1. ОСОБЕННОСТИ ТЕЧЕНИЯ ГАЗА В ВЫХЛОПНОМ КАНАЛЕ ХКЙЛ

Современное проектирование сложных газодинамических устройств является многоэтапным процессом. На первом этапе — эскизного проектирования — выбираются основные конструктивные решения, уточняется облик установки, определяется геометрия газодинамического канала, оцениваются основные характеристики. Естественно, на этом этапе проводится большой объем вычислений. Если для первоначального выбора геометрии канала — первого приближения — можно воспользоваться простыми интегральными полуэмпирическими моделями, то для второго этапа — оптимизации формы канала — необходимы параметрические исследования на основе трехмерных расчетов вязких течений. Параметрические исследования подразумевают серии расчетов при последовательном варьировании главных параметров канала (степени поджатия, длины пилонов, длины самого канала и т. д.). При этом заранее должна быть проведена верификация численной модели, которая часто требует проведения экспериментов на модельных установках. Заключительной стадией являются пусконаладочные работы, во время которых решаются вопросы запуска и схода с режима установки, определяется область оптимальных режимов реализованного сверхзвукового химического лазера (подробнее в [5, 6]). Далее будут представлены материалы, фактически иллюстрирующие на примере СВД ХКЙЛ эти этапы создания сложной газодинамической установки.

В общем случае СВД СХЛ состоит из следующих основных частей: сверхзвуковой диффузор (СД), переходная камера, теплообменник и эжектор (ЭЖ) [1, 2]. Система принципиально похожа на выхлоп сверхзвуковых аэродинамических

труб. Однако воспользоваться ранее разработанными методиками для точной оценки основных рабочих характеристик СВД не удастся из-за наличия следующих существенных особенностей течения в газодинамическом тракте СХЛ:

- лазерный канал прямоугольный в сечении с большим отношением сторон, течение в нем сильно отличается от течения в круглой трубе. Большое влияние на поток оказывают трехмерные эффекты в углах, когда возможно даже образование отрывных зон;

- сверхзвуковое течение в канале характеризуется внутренним тепловыделением, обусловленным химическими реакциями в случае HF/DF-СХЛ и процессами термализации молекул синглетного (возбужденного) кислорода в случае ХКЙЛ. При этом на параметры самого течения в канале влияет режим работы лазера (при наличии генерации часть энергии выводится в виде излучения, тепловыделение в потоке уменьшается);

- характерные числа Рейнольдса —  $Re$  потоков, как правило, на порядок ниже соответствующих значений в аэродинамических трубах (а значит толще пограничные слои и сильнее влияние эффектов вязкости). Утолщение пограничного слоя вдоль стенок диффузора приводит к возрастанию эффекта поджатия канала, что необходимо учитывать.

На рис. 1 показаны распределения статического давления вдоль канала традиционного пассивного диффузора ХКЙЛ в экспериментах с генерацией излучения. Крайние правые точки в распределениях соответствуют давлению в вакуумной емкости – противодавлению. При достаточно низком противодавлении в лазерной камере реализуется расчетное течение (статическое давление  $p = 1 \div 1,5$  Торр, число Маха потока на входе в диффузор  $M = 2,4-2,5$ ), а по всей длине сверхзвукового диффузора (СД) существует сверхзвуковой режим течения. По мере роста противодавления не только псевдоскачок смещается ближе к сопловому блоку (на рисунке видно, как сглаживается при этом провал давления, вызванный скачками

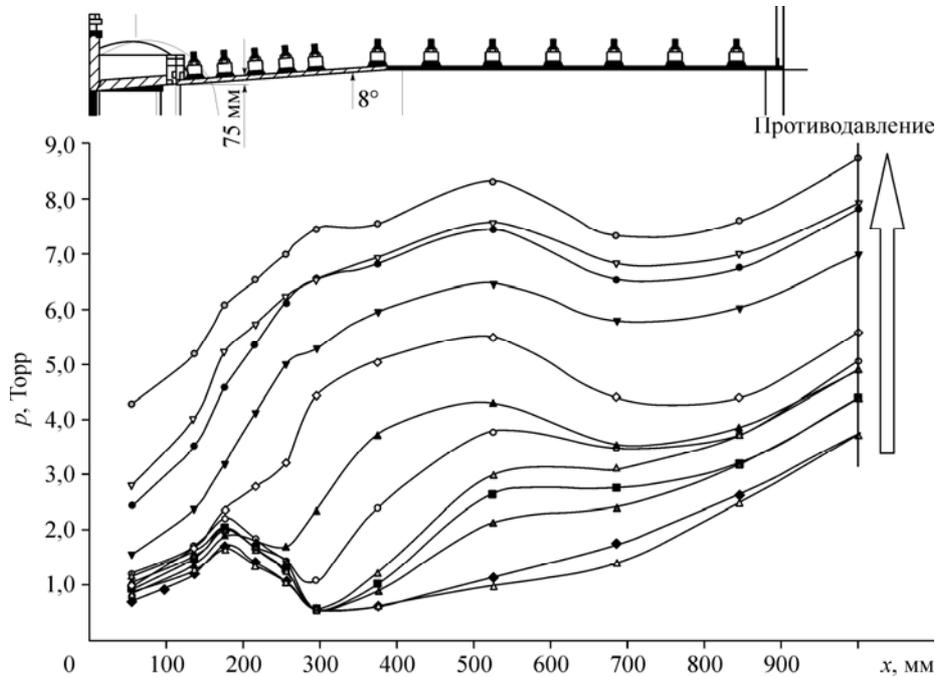


Рис. 1. Распределение давления вдоль центрального канала пассивного диффузора ХКЙЛ при увеличении противодавления.

уплотнения от пилонов), но и давление в первой точке (в резонаторной полости) сразу начинает расти. Это означает, что возмущения, возникающие на выходе из диффузора, по толстому пограничному слою передаются вверх, хотя течение в канале сверхзвуковое (известный эффект в аэродинамике). Пассивный СД фактически не выполняет своей функции и для устранения подобного эффекта необходим, например, отсос пограничного слоя.

Как отмечалось в [8], газодинамический тракт ХКЙЛ (сопловой блок, лазерная камера (ЛК) и сверхзвуковой диффузор) должен рассчитываться и проектироваться как одно целое, в отличие, например, от канала аэродинамической трубы, когда СД может рассчитываться независимо (требуется лишь знание числа Маха на входе в диффузор). Связано это с выделением тепла, которое начинается уже в сопловом блоке и продолжается по всей длине канала. Количество тепла зависит: от конструкции соплового блока — как организовано смешение, от количества синглетного кислорода — как сконструирован генератор синглетного кислорода, от состава всей смеси — что и в каких количествах используется в качестве разбавителя (так, при использовании гелия и азота параметры потока лазерного газа разные). Форма канала ЛК при этом должна рассчитываться с учетом закона тепловыделения вдоль канала.

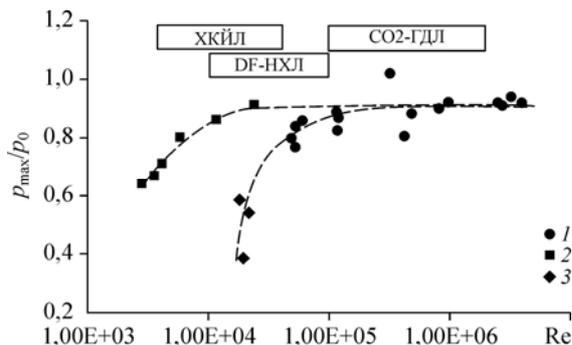
Чтобы компенсировать тепловыделение, лазерная камера делается расширяющейся [9] с начальным углом раскрытия  $\sim 3^\circ\div 4^\circ$  (для стандартных параметров ХКЙЛ). Стенка ЛК делается профилированной, чтобы избежать появления скачков уплотнения с широких стенок канала. В то же время в ряде работ отмечалось, что пограничный слой в ХКЙЛ настолько толстый, а профиль скорости — мало-наполненный (производная  $du/du$  около стенки близка к нулю), что даже при таком небольшом угле раскрытия может происходить его отрыв, который ведет к появлению ударных волн в области резонатора. Поскольку плоскость этих ударных волн располагается вдоль оптической оси резонатора, этот эффект ведет к ухудшению оптического качества потока. Негативный эффект предлагалось снизить, например, за счет специальной конструкции соплового блока.

Проведенные эксперименты и расчеты показывают, что второй причиной появления нежелательных скачков в ЛК являются скачки, связанные с ранним началом торможения потока из-за тепловыделения (сверхзвуковой поток тормозится при подводе тепла [10]). Процесс формирования псевдоскачка начинается с образования ударных волн при натекании сверхзвукового потока на пограничный слой, нарастающий вдоль стенок канала. Ударные волны, падая на пограничный слой, вызывают его дальнейший рост, возможен даже его отрыв, см. [10]. Это, в свою очередь, ведет к смещению скачков уплотнения, образующих псевдоскачок, ближе к сопловому блоку, в область резонатора. Поскольку плоскость этих скачков параллельна оси резонатора, они также ухудшают оптическое качество потока: волновой фронт выходного излучения искривляется, расходимость излучения лазера, соответственно, увеличивается.

Таким образом, процесс торможения в канале ХКЙЛ определяется двумя одновременно действующими факторами — тепловыделением и наличием системы косых скачков уплотнения, которые возникают из-за нарастания пограничного слоя на стенках канала. Рост толщины пограничного слоя естественно ведет к увеличению вязких потерь и снижению эффективности работы диффузора. На рис. 2 показана оценка эффективности работы выхлопных пассивных диффузоров в зависимости от числа  $Re$  (эффективность восстановления давления обычно оценивается по отношению максимального давления восстановления  $p_{\max}$  к давлению за прямым скачком  $p'_0$ ). Здесь же нанесены рабочие области по числам  $Re$  для разных

Рис. 2. Зависимость давления восстановления за СД от вязкости потока.

1 — экспериментальные данные [14], 2 — расчеты настоящей работы, 3 — эксперименты с модельным ХКЙЛ [8] ( $T_0$  в канале СД меняется от 300 до 500 К). Прямоугольные рамки с наименованиями типов лазеров — рабочие области по числам Re для разных типов СХЛ.



типов СХЛ (прямоугольные рамки с наименованиями типов лазеров). Как видно, эффективность пассивных СД в областях низких чисел Re, характерных для СХЛ, резко падает, отличие от интегральной теории становится очень большим. Поэтому для оценки характеристик СД необходимы трехмерные расчеты вязких течений на основе турбулентных уравнений Навье–Стокса. А для успешного проектирования СВД необходимы параметрические исследования на основе такой методики с целью отыскания наилучшей геометрии как СД, так и ЭЖ.

Из результатов, представленных на рис. 1, 2, следует, что для достижения эффективной работы СД, уменьшения вязких потерь (и, следовательно, повышения давления восстановления) следует предпринять меры с целью ограничения роста пограничного слоя. Одним из эффективных методов управления, используемых в физических экспериментах, является отсос пограничного слоя. Но на практике, особенно для масштабных (тем более мобильных) установок, этот метод трудно реализуем, т. к. требует наличия высокопроизводительного вакуумного оборудования.

Более перспективным вариантом выглядит организация вдува через малоразмерные сопла высоконапорного газа вдоль стенок канала. В этом случае профиль скорости в пограничном слое становится наполненным, уменьшается эффективная толщина пограничного слоя, резко снижается вероятность возникновения отрывов. Подобное решение было успешно использовано при реализации одноступенчатого аэродинамического окна, рассчитанного на высокую степень перепада по давлению  $\varepsilon = 100$  [11] (аэродинамические окна используются для вывода излучения мощных лазеров, но обычные одноступенчатые окна характеризуются значениями  $\varepsilon = 30 \div 40$ , и для СХЛ приходится делать двухступенчатые аэродинамические окна). Однако в нашем случае высоконапорный газ для продувки в пассивном диффузоре будет дополнительной нагрузкой для эжектора, который обеспечивает выхлоп пассивного газа после диффузора в окружающую среду.

Как уже отмечалось, для обеспечения выхлопа ХКЙЛ в атмосферу необходимо иметь СВД со степенью сжатия  $\varepsilon > 40$ , что требует применения — кроме пассивного диффузора — двухступенчатого эжектора. Поэтому, если использовать вдув в пассивном СД, то рационально совместить такой СД с первой ступенью эжектора с помощью устройства, описанного ниже и названного авторами настоящей работы активным диффузором. Активный диффузор (АД) будет фактически представлять собой нетрадиционный периферийный эжектор прямоугольного сечения, работающий по схеме “сверхзвук–сверхзвук”, где в качестве активного газа может использоваться холодный воздух.

Согласно изложенной выше методике создания газодинамических установок [5, 6], на начальном этапе сделаны оценки геометрических размеров АД по одномерной теории, затем проведено трехмерное моделирование течения в канале

диффузора. Расчеты выполнялись для различных вариантов АД, отличающихся способом и величиной поджатия канала, количеством и типом пилонов, расходом активного газа. Решение задачи численного моделирования проводилось с помощью пакета CFX. Модель АД была выполнена в формате пакета SolidWorks и импортирована в расчетный пакет CFX через формат IGES. В настоящих расчетах и в работах [6, 12] использовалась SST (Shear Stress Transport) модель турбулентности. В качестве рабочего тела рассматривалась многокомпонентная химически реагирующая смесь идеальных газов.

Экспериментальная отработка АД проводилась на установке, подробное описание которой приведено в [13]. Ранее на этой установке выполнялись исследования параметров пассивных СД при работе с ХКЙЛ, некоторые результаты которых приведены в [8]. В состав установки входили ХКЙЛ с диффузором, система вакуумной откачки, система управления и сбора данных. Лабораторный ХКЙЛ имел следующие параметры: мощность излучения 12 кВт, расход активной среды 60–70 г/с (в качестве разбавителя использовался азот), статическое давление в лазерной камере  $p = 3\text{--}5$  Торр при числе Маха потока на входе в диффузор  $M = 1,7$  и температуре торможения  $T_0 = 450$  К, молекулярный вес газа  $\mu = 30$  г/моль. Размер соплового блока на срезе составлял  $60 \times 366$  мм, поперечное сечение канала на входе в диффузор —  $90 \times 366$  мм.

## 2. УСТРОЙСТВО И ПАРАМЕТРЫ АКТИВНОГО ДИФFUЗОРА

Активный диффузор (рис. 3) состоял из пассивной и активной частей и соплового блока (3). Пассивная часть плавно сопрягалась с ЛК (2) (резонаторной полостью) короткой расширяющейся входной частью диффузора (6), которая дальше разделена на части пилонами (7). Пилоны делят общий прямоугольный канал на несколько каналов (с поперечными сечениями близкими к квадрату), что позволяет сократить продольные размеры устройства. Активная часть АД — это пери-

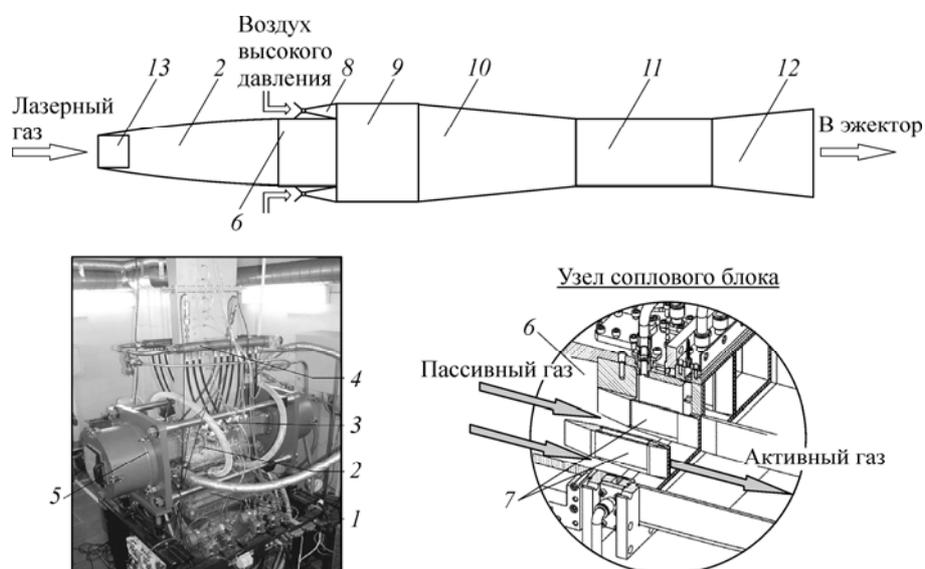


Рис. 3. Состав АД и схема течения в сопловом блоке.

1 — генератор синглетного кислорода, 2 — лазерная камера, 3 — сопловый блок АД, 4 — подающий коллектор, 5 — резонатор, 6 — входная часть АД, 7 — пилоны, 8 — малоразмерные сопла, 9 — камера постоянного сечения, 10 — камера с поджатием, 11 — горло АД, 12 — дозвуковой диффузор, 13 — сопловый блок лазера.

ферийный сопловой блок (3), небольшая камера постоянного сечения (9), камера смешения с поджатием (10), горло АД (11) и дозвуковой диффузор (12), после которого давление газа должно достигнуть значения, необходимого для обеспечения работы второй ступени СВД.

Сопловой блок выполнен в виде отдельного фланца: со стороны пассивной части АД он плавно сопрягается с каналом, а с камерой постоянного сечения (9) сопловой блок образовывал внутренний уступ, в котором расположены малоразмерные осесимметричные сопла (8) для подачи активного газа. Малоразмерные сопла, рассчитанные на число  $M = 4,5$ , располагались по всему периметру канала, а также в торцах пилонов. Выходной диаметр сопел составлял величину 3,5 мм.

Использование в устройстве большого числа мелкомасштабных струй обеспечивает эффективное смешение низко- и высоконапорного сверхзвуковых потоков, а эжектирующий эффект работы АД заметным образом, как показали эксперименты, сказывался на течении в лазерной камере.

В качестве активного газа использовался холодный воздух, что, как показали исследования, позволило уменьшить влияние тепловыделения на параметры течения в канале диффузора. Расход эжектирующего газа АД в экспериментах варьировался в достаточно широком диапазоне (давление в подающем коллекторе (4) менялось от 5 до 15 атмосфер, оставаясь фиксированным в течение опыта). При работе на вакуумную емкость расход определяет величину срывного давления АД. При работе в составе СВД расход подбирался таким образом, чтобы характеристика АД и нагрузочная характеристика эжектора пересеклись.

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

В работе исследовались два типа диффузоров с поджатием по широкой и узкой сторонам, изучалась роль активных пилонов при формировании течения в АД. Согласно работе [14], в обычных пассивных сверхзвуковых диффузорах способ поджатия оказывает большое влияние на давление запуска диффузора. При этом максимально допустимая степень поджатия, при которой возможен запуск диффузора, как правило, ниже теоретического значения (для рассматриваемого случая это 1,12 и 1,2 соответственно). Варьировались раскрытие лазерной камеры, геометрическая степень поджатия камеры смешения АД, количество пассивных и активных пилонов, соотношение давлений в периферийных соплах и соплах пилонов и изучалось влияние этих параметров на давления запуска АД и восстановления. Конечная цель исследования заключалась в подборе конфигурации и параметров активного диффузора, обеспечивающих запуск лазера с давлением торможения в ЛК  $\sim 20$  Торр и противодавлением за АД  $\sim 50\text{--}55$  Торр (такое давление в промежуточной камере должен обеспечивать ЭЖ на рабочем режиме, т. е. на расходе эжектируемого газа, равном суммарному расходу лазера и АД).

Пример расчетов для одной четверти течения в канале приведен на рис. 4, где показано распределение параметров активного газа в продольной плоскости симметрии и звуковая линия для противодавления в 32 Торр, близкого к предсрывному. В предложенном устройстве торможение пассивного потока происходит в каналах, образованных струями высоконапорного газа (на рис. 4 видно газодинамическое горло, образованное этими струями, которое достигает расширяющейся выходной части АД). При этом стенки канала (границы высоконапорного и низконапорного потоков) определяются условием равенства давлений и, следовательно, газодинамикой истечения. Условие прилипания на стенке пилон изменяется на условие непротекания, трение и пограничные слои вдоль границы раздела отсутствуют. В результате формируются газодинамические каналы с саморегулируемым горлом, в которых происходит торможение сверхзвукового потока и одно-

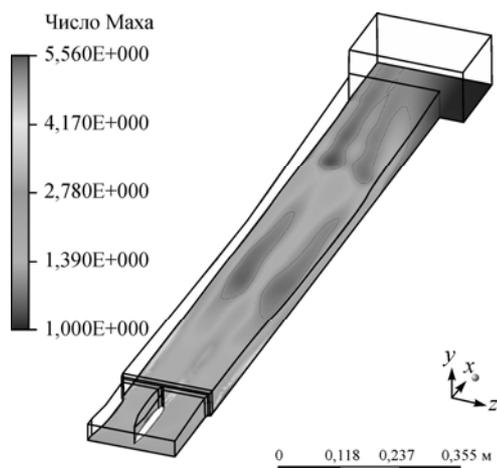


Рис. 4. Распределение числа Маха в плоскости симметрии канала АД.

временное смешение низконапорного и высоконапорного газа. Течение в пассивной и в начале активной части АД сверхзвуковое, передача возмущений вверх по течению по пограничному слою отсутствует и течение в лазерной камере остается невозмущенным в процессе работы СВД.

Данный канал с поджатием по широкой стороне и раскрытием лазерной камеры 1,5, геометрической

степенью поджатия камеры смещения АД 1,29 и активными пилонами запускается при высоком давлении лазерного газа  $p_3 = 32$  Торр. Максимальное давление восстановления на выходе активного диффузора (максимальный уровень противодавления, при котором сохраняется сверхзвуковой режим течения в лазерной камере) для такого варианта составляет  $p_{\max} = 35$  Торр.

Для исследования роли активных пилонов при работе АД была проведена серия расчетов подобной геометрии канала, в котором менялось число активных пилонов и производилась замена активных пилонов на пассивные с толщиной 3 мм. Результаты расчетов показали, что установка активных пилонов улучшает характеристики диффузора (снижает  $p_3$  и повышает  $p_{\max}$ ). Увеличение числа активных пилонов (при сохранении общего расхода эжектирующего газа), а также расхода газа через пилоны приводит к увеличению  $p_{\max}$ .

Серия расчетов для каналов с поджатием по узкой стороне, которое технически осуществляется с помощью накладок, установленных на боковых стенках канала и центральном пилоне, показала, что такой вариант организации внутреннего канала АД дает гораздо лучшие результаты. В этом случае давление запуска снизилось до 25 Торр, и при установке в канал достаточного количества пилонов (в нашем случае при ширине канала  $\sim 360$  мм использовалось пять пилонов) давление срыва достигало  $\sim 50$ – $55$  Торр, что соответствовало расчетному значению, которое должен обеспечивать эжектор при данной нагрузке.

#### 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НА МОДЕЛЬНОЙ УСТАНОВКЕ

Концепция активного диффузора апробировалась на модельной установке [13] с выхлопом отработанных газов из ХКЙЛ в вакуумную камеру (см. рис. 3, фото). В ходе экспериментов варьировались расходы активного и пассивного газа, начальный уровень противодавления (вакуумная камера откачивалась до разных уровней давления), режимы подачи пассивного лазерного газа и активного газа — воздуха (менялось соотношение давлений в коллекторах пилонов и периферийных сопел). Результаты экспериментов использовались для дальнейшей верификации численной модели.

На первом этапе в качестве пассивного газа использовался холодный воздух. Воздух подавался в ХКЙЛ двумя путями: через генератор синглетного кислорода и в инжекторы соплового блока, при этом выдерживались соотношения расходов, характерные для ХКЙЛ. Основной задачей этого этапа экспериментов была вери-

Рис. 5. Распределение давления в канале активного диффузора.  
Противодавление  $p_{\infty} = 50$  (1), 55 (2), 57 (3), 60 (4) Торр, данные экспериментов:  $p_{\infty} = 55$  Торр (5).

фикация методики трехмерных расчетов АД. На втором этапе проводились полномасштабные эксперименты АД с ХКЙЛ с выводом и без вывода излучения.

На рис. 5 показаны распределения давления вдоль стенки канала для одного из вариантов АД, работающего с ХКЙЛ. Резкое повышение давления на кривых соответствует области торможения потока до дозвуковых скоростей в расширяющейся части АД. Видно, что при увеличении противодавления кривые  $p(x)$  сдвигаются к сопловому блоку АД, но расчетный уровень давления в резонаторе сохраняется. Таким образом, главная задача АД — обеспечение постоянства режима течения в резонаторной полости — в данном случае выполняется. Следует отметить хорошее совпадение расчетных и экспериментальных данных.

Динамика работы ХКЙЛ с АД и выхлопом в вакуумную камеру показана на рис. 6. Здесь представлено распределение мощности лазерного излучения по времени (кривая б) совместно с распределениями давления в разных точках газодинамического тракта. Буферный газ начинает поступать в тракт при  $t = 1,7$  с и с этого момента начинается рост давления в вакуумной камере. В момент  $t = 3,0$  с подаются хлор и йод, резко возрастает давление в генераторе синглетного кислорода и перед сопловым блоком лазера в 4,2 с, начинается генерация. Для демонстрации эффекта работы АД сначала он не включен и работает как пассивный СД, поэтому статическое давление  $p$  (кривые 1 и 2) в ЛК растет в соответствии с ростом противодавления в вакуумной камере (кривая 4) и достигает 5 Торр.

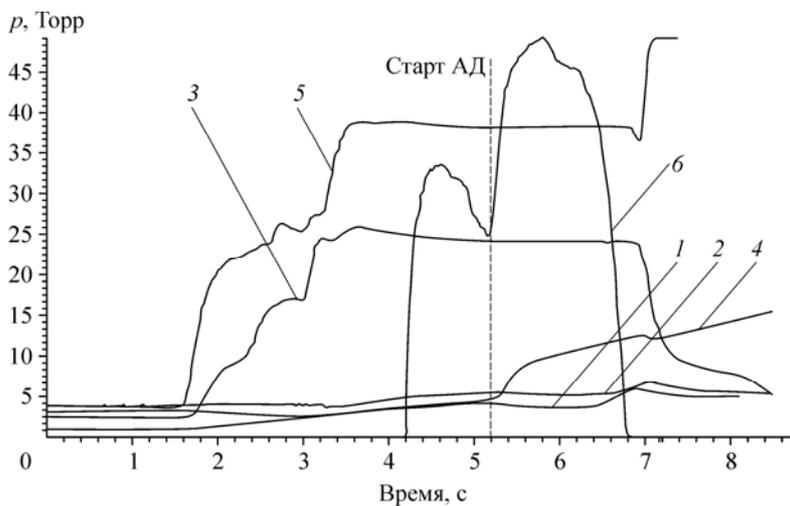


Рис. 6. Изменение параметров во время пуска ХКЙЛ с АД.

Давление в ЛК на расстоянии  $x = 60$  (1) и 110 (2) мм от среза сопла лазера, давление перед сопловым блоком лазера (3), противодавление (4), давление в генераторе синглетного кислорода (5), мощность лазера (в условных единицах) (6).

означает уменьшение числа Маха, что связано с утолщением пограничного слоя на стенках ЛК. Это, в свою очередь, как показывают расчеты, приводит к смещению зоны псевдоскачка ближе к сопловому блоку лазера, т. е. к резонатору. Мощность лазера в этот отрезок времени падает. Началу работы АД соответствует  $t = 5,2$  с. Давление в ЛК сразу возвращается к первоначальному уровню, т. е. падает на 1,5 Торра (кривая 1) и уже не меняется, несмотря на то, что противодавление растет.

Падение давления в ЛК связано с ростом числа Маха потока. Это происходит из-за отсоса пограничного слоя со стенок ЛК благодаря эжектирующему эффекту, который создает работающий АД: эффективная площадь раскрытия ЛК увеличивается, поток разгоняется, а вся зона торможения при этом смещается вниз по потоку, т. е. эжектирующий эффект работы АД заметным образом сказывался на течи в лазерной камере.

Как видно, за счет улучшения условий для генерации мощность лазера заметно возросла. Следует отметить, что выросло время работы лазера на имеющийся объем вакуумной камеры. Без активного диффузора сверхзвуковой режим в лазерной камере срывается раньше — в момент времени  $t = 5,3-5,4$  с.

Таким образом, применение АД позволяет сохранить невозмущенной область низкого давления в резонаторной полости, расширить временной интервал работы ХКЙЛ при ограниченных возможностях системы откачки и поднять его мощность.

Распределения статического давления вдоль канала АД, установленного на ХКЙЛ, представлены на рис. 7. Заметное влияние на распределение  $p(x)$  в начальной области канала оказывает тепловыделение, что видно из сравнения данных 4, 1 и 5, полученных соответственно при выводе излучения мощностью 10 и 5 кВт, а также без вывода излучения (без зеркал в резонаторе), т. е. при максимальном уровне тепловыделения. Уровень давления при снижении мощности излучения закономерно растет, т. к. возрастает тепловыделение в потоке и число Маха в конце лазерной камеры падает (для указанных кривых по данным измерений полных и статических давлений  $M = 1,85, 1,8, 1,75$  соответственно). Здесь же приведены данные 2, полученные без подачи йода в инжекторы соплового блока,

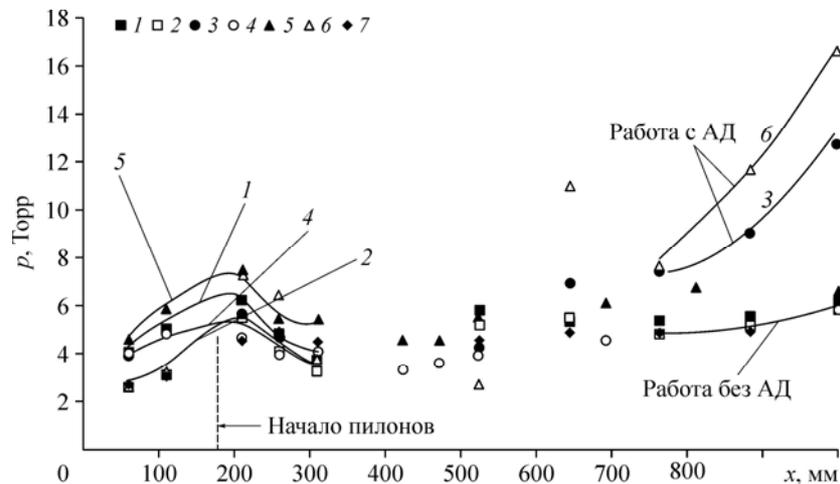


Рис. 7. Зависимость давления вдоль канала АД от уровня выводимой мощности  $P_w$  лазерного излучения.

$p_w = 5$  кВт,  $M \sim 1,8$  (1);  $p_w = 0$ , нет расхода йода, тепловыделение  $dQ = 0$ ,  $M \sim 2,15$  (2);  $p_w = 4,2$  кВт, работа с АД (3);  $p_w = 10$  кВт,  $dQ = \min$ ,  $M \sim 1,85$  (4);  $p_w = 0$ , без резонатора,  $dQ = \max$ ,  $M \sim 1,75$  (5);  $p_w = 0$ ,  $dQ = \max$ , острые пилоны, работа с АД (6);  $p_w = 0$ ,  $dQ = \max$ , острые пилоны (7).

т. е. без тепловыделения. Число Маха пассивного газа при этом составило 2,15 и уровень давлений был заметно ниже. Снижение давления (возмущений потока) в области перед пилонами на режимах 6 и 7 связано с использованием в этом случае пилонов с максимально острыми носами. Работающему АД с подачей активного газа соответствуют данные 3 и 6, давление восстановления (в конце канала) в этом случае, естественно, возрастает.

Отмеченное сильное взаимовлияние режима работы лазера и параметров течения в газодинамическом тракте составляет одну из главных трудностей в многопараметрической задаче о выхлопе ХКЙЛ. Разработка и запуск СВД на базе АД для ХКЙЛ требует не только большого объема вычислений, моделирующих все физические и газодинамические процессы в лазере, но и экспериментальной отработки всей системы для согласования реальных характеристик лазера, АД и ЭЖ и выбора оптимальных режимов их работы.

##### 5. РАБОТА АКТИВНОГО ДИФфуЗОРА В СОСТАВЕ СВД ХКЙЛ С ВЫХЛОПОМ В АТМОСФЕРЕ

Результаты численных исследований и модельных испытаний АД на вакуумную камеру использовались при создании экспериментального комплекса ХКЙЛ с шириной активной зоны более одного метра, работающего по открытому циклу в атмосферу. СВД состояла из двухканального АД и двухтрубной эжекторной станции, т. е. фактически была составлена из двух модулей. Сопловой блок лазера состоял тоже из двух модулей, но имел единую лазерную камеру, к которой пристыковывались модули АД. Подача газа в сопла АД производилась от общего коллектора. Блочный принцип построения обычно используется при создании мобильных комплексов большой мощности (в работе [1] комплекс комплектуется из четырнадцати одинаковых модулей: каждый включает лазер, пассивный СД и 6-трубную эжекторную станцию).

Сверхзвуковой поток на входе в СВД имел следующие параметры: число Маха — 1,7,  $T_0 = 450\text{--}500$  К, статическое давление в ЛК — 4 Торра, показатель адиабаты — 1,4, молекулярный вес смеси 30 г/моль, степень поджатия канала в АД — 1,2, расчетное полное давление пассивного потока на входе в эжектор (ЭЖ) ~ 50 Торр. В качестве эжектирующего газа в АД использовался холодный воздух, а в эжекторе — смесь, получаемая в парогазогенераторе из продуктов сгорания топливной композиции спирт + воздух и паров воды при  $T_0 = 1400$  К. Использовались парогазогенераторы, аналогичные по конструкции и параметрам, описанным в работах [2, 5]. Как и в системе восстановления давления HF/DF-лазера, они работали в двухступенчатом режиме: эжекторы запускались при повышенных значениях расхода газов — большом давлении в парогазогенераторах, а после запуска ЭЖ давление в парогазогенераторах уменьшалось — расходы снижались в 1,5 раза до рабочих значений. Время стартового режима составляло 1,5–2 с, рабочего — до 20 с. В процессе отработки комплекса была решена задача синхронизации запуска двух парогазогенераторов, что потребовало усложнения системы подачи компонентов топлива. Отметим, что рассогласование в их работе может привести к недозапуску всей системы или даже к аварийным ситуациям.

Газодинамический сход с режима эжектора обеспечивался, как и в работе [5], подачей большого расхода воздуха через специальные коллекторы, установленные в каждом канале перед эжектором, за 1-2 секунды до выключения парогазогенераторов.

Система управления и сбора данных экспериментальных стендов аналогична описанной в работе [5]. Измерения давлений проводились с помощью набора датчиков МИДА (Микроэлектронные Датчики), обеспечивающих точность 0,5 % в широком диапазоне измерений.

Как известно, традиционные сверхзвуковые ЭЖ центральной или периферийной схемы работают по принципу “сверхзвук–дозвук” [10], т. е. эжектируемый газ — сверхзвуковой, а эжектируемый — дозвуковой. Подобные ЭЖ хорошо изучены и запуск газодинамических систем на их основе не представляет особых трудностей [2, 5]. В нашем случае АД фактически является эжектором типа “сверхзвук–сверхзвук”. Запуск таких эжекторов имеет свою специфику [15]. Создание необходимых условий для их запуска, согласование режимных параметров АД с параметрами работы лазера и ЭЖ составляет основную трудность на этапе “пуск–наладка” всей системы.

По циклограмме пуска работа комплекса начинается со старта ЭЖ, который создает разрежение во всем газодинамическом тракте комплекса. Сам процесс запуска является нестационарным и определяется не только соотношением давлений в ЛК, на входе и выходе из АД (перед ЭЖ), но и историей процессов: как и с каким темпом система выводится на рабочие режимы. Важно при этом согласовать время старта лазера с процессом запуска АД — ранний старт приводит к срыву потока в АД. Этот вопрос не может быть решен только на основе расчетных данных и требует проведения для каждого комплекса во время отладки специальных опытов, так как запускная кривая является индивидуальной характеристикой каждого конкретного канала [6].

В работе [2] отмечалось, что совместная в СВД работа СД и ЭЖ на более эффективных срывных характеристиках возможна при наличии промежуточной емкости. В описываемой установке между АД и ЭЖ такая промежуточная камера была установлена. При работе лазера в комплексе с СВД давление в камере (противодавление для АД) зависит от производительности эжектора и гидравлического сопротивления канала, т. е. как выстроена конструкция канала в целом: как организован вход АД в промежуточную камеру, как ее геометрия согласована со входом в ЭЖ и т. д.

Натурные полномасштабные эксперименты с ХКЙЛ отличаются высокой стоимостью, поэтому при отработке ЭЖ и согласовании работы АД с ЭЖ в качестве пассивного газа на первом этапе использовались продукты сгорания природного газа в специальной горелке. Проходя через смесительную камеру и специально спроектированное для таких испытаний сопло, они формировали на входе в АД сверхзвуковой поток с заданными газодинамическими параметрами: числом Маха, молекулярным весом, температурой, показателем адиабаты (тепловыделение и некоторые другие эффекты при этом, естественно, не моделировались). Но окончательная доводка и отладка системы возможна только в экспериментах с действующим лазером, когда в потоке возникает тепловыделение, которое оказывает сильное воздействие на работу АД.

На рис. 8 показана динамика изменения параметров в канале АД и промежуточной камере при старте и во время работы лазера с СВД. Воздух в АД подается через 5,2 секунды после начала работы установки, что видно по резкому возрастанию давления в промежуточной камере (линия 5, значения  $p$  в Торр) и форкамерах обоих каналов АД (кривые 3 и 4, значения  $p$  в атм). К этому моменту ЭЖ уже запущен, его стартовый режим закончился и он переведен на рабочий режим, давления в промежуточной камере и канале АД понизилось до 8 Торр. После включения АД давление в ЛК продолжает падать (кривые 1 и 2 — данные измерений в первых точках каналов на расстоянии 43 мм от соплового блока) и к моменту

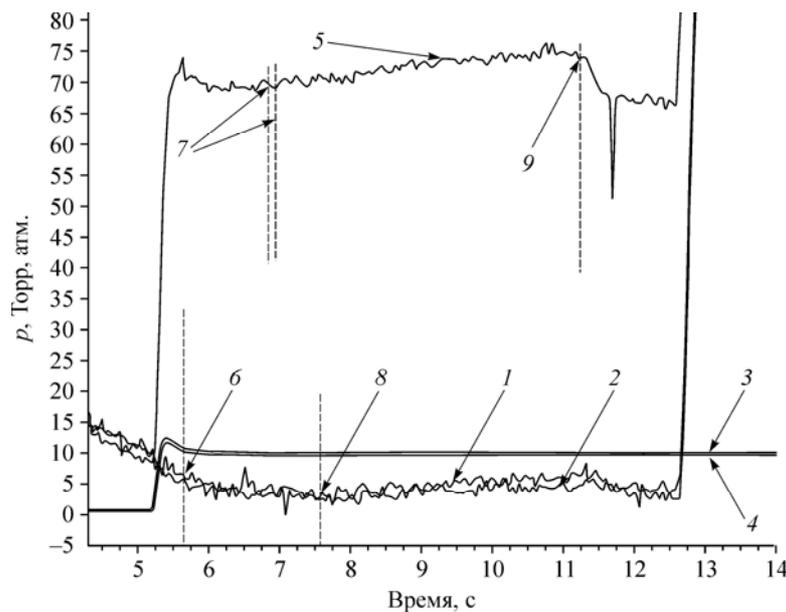


Рис. 8. Распределение давления в газодинамическом тракте при запуске и во время работы СВД ХКЙЛ с АД.

Давление в левом (1), в правом (2) канале АД; давление торможения в форкамере левого (3), правого (4) канала (атм); давление в промежуточной емкости (5); начало подачи несущего газа (6), щелочного раствора перекиси водорода и хлора (7); начало подачи йода (8) в ХКЙЛ; окончание работы лазера (9).

начала генерации (момент 8 — начало подачи йода) достигает 2,5–3 Торр. Начало подачи основных компонент в ХКЙЛ отмечено линиями: 6 — подача несущего газа (азота), 7 — подача щелочного раствора перекиси водорода и хлора, 9 — выключение лазера.

Как видно, статическое давление в резонаторе лазерной камеры во время режима немного повышалось, что было связано с ростом давления в парогазогенераторе. Но важно то, что удалось добиться полной идентичности работы каналов, что подтверждается близостью кривых 1 и 2. После выключения лазера (прекращения подачи компонент) по циклограмме пуска активный диффузор некоторое время еще продолжает работать — до начала газодинамического срыва эжектора (см. [5]). После этого прекращается подача газа в АД и затем, в последнюю очередь, в ЭЖ.

Улучшение рабочих характеристик ЭЖ (и соответственно СВД) может быть достигнуто за счет увеличения числа Маха сопла (в пределах допустимого по условиям конденсации для эжектирующего газа). Настоящая конструкция позволяла изменять диаметр критического сечения сопла ЭЖ за счет использования сопловых вставок. Увеличение числа Маха приводит к улучшению нагрузочной характеристики ЭЖ (см. [5]) — к снижению давления в промежуточной камере между СД и ЭЖ при фиксированных значениях расхода эжектируемого газа (АД + лазер). Из предыдущих исследований ЭЖ с поджатием канала известно, что степень сжатия потока  $\varepsilon$  зависит от величины сужения камеры смешения. В принципе геометрия канала ЭЖ рассчитывалась из условия достижения максимальной степени сжатия потока  $\varepsilon$ . Однако эксперименты показали, что возможно дальнейшее сужение канала по сравнению с расчетным значением. Уменьшение горла трубы ЭЖ, которое достигалось за счет специальных вставок, позволяло улучшить нагрузочную характеристику ЭЖ, т. е. понизить уровень давления перед ЭЖ для тех же нагрузок.

В настоящих экспериментах получен общий коэффициент эжекции (отношение расхода лазера к суммарному расходу АД и ЭЖ)  $n = 0,03$ . Для сравнения СВД для ХКЙЛ обычной схемы с двухступенчатым эжектором в [16], имела  $n = 0,001$  (большое отличие связано, очевидно, с несовершенством конструкции СВД в [16]). При этом отметим следующее. Газодинамический тракт данной установки не являлся оптимальным: в силу ряда причин компоновка тракта была не линейной, а имелся поворот на  $180^\circ$ , который осуществлялся на промежуточной камере (в дозвуковой области течения). Поворот означает наличие дополнительных гидравлических потерь, что естественно ведет к снижению общей эффективности СВД.

Далее, на данном этапе работ использовались традиционные эжекторы центральной схемы. Характеристики таких ЭЖ могут быть улучшены за счет интенсификации процесса смешения активного и пассивного потоков в камере смешения. В работе [5] показано, что использование насадок типа шевронов или табов на центральном сопле ЭЖ позволяет увеличивать степень сжатия  $\varepsilon$  до 20 % при тех же  $n$ . Возможно дальнейшее улучшение характеристик ЭЖ при использовании многоструйных схем подачи активного газа. Численные оценки показывают: технология АД при использовании ЭЖ нового типа (многоструйных) позволит достичь для коэффициента эжекции СВД, обеспечивающего работу наземного ХКЙЛ (с типичными параметрами потока в резонаторе: число  $M = 1,8$ , статическое давление  $p = 3-4$  Торр,  $T_0 = 300-350$  К,  $\mu = 30$  и давление в генераторе синглетного кислорода  $p_0 = 30-35$  Торр) значений  $n = 0,06$ . При таких коэффициентах эжекции возможность создания наземных мобильных лазерных комплексов на базе ХКЙЛ становится практически реализуемой.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты исследований показали, что схема СВД, состоящая из активного диффузора и одноступенчатого эжектора, по сравнению с обычной схемой (пассивный СД и двухступенчатый эжектор) обладает следующими преимуществами:

- течение в лазерной камере изолируется от обратного влияния изменения параметров в зоне выхлопа диффузора;
- снижается влияние тепловыделения на течение в диффузоре за счет подмешивания к лазерному газу высоконапорного холодного воздуха;
- общая длина газодинамического тракта СВД сокращается на 30 %;
- при заданной степени сжатия как минимум в два раза повышается коэффициент эжекции по сравнению с максимально возможным коэффициентом эжекции для оптимального варианта СВД обычной схемы;
- отсос пограничного слоя в лазерной камере за счет эжектирующего эффекта при работе АД позволяет предотвратить раннее начало торможения сверхзвукового потока в ЛК и нежелательное появление в резонаторной полости первых косячих скачков, с которых начинается формирование структуры псевдоскачка (т. е. предотвратить ухудшение оптического качества активной среды лазера из-за появления этих скачков в зоне резонатора).

#### СПИСОК ОСНОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

АД — активный диффузор,  
ЛК — лазерная камера,  
СВД — система восстановления давления,

СД — сверхзвуковой диффузор,  
СХЛ — сверхзвуковой химический лазер,  
ХКЙЛ — химический кислородно-йодный лазер,  
ЭЖ — эжектор.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Koop G., Hartlove J., Clendening C., Lohn P., Shih C.C., Rothenflue J., Hulick K., Truesdell K., Walter R. Airborn laser flight-weighted laser module (FLM) and COIL modeling support // AIAA Paper. No. 2000-2421, XXXI Plasmadynamics and laser conf. Denver, 2000.
2. Борейшо А.С., Киселев И.А., Орлов А.Е., Савин А.В., Шалимов В.П., Мальков В.М., Хайлов В.М. Системы восстановления давления мощных газовых и химических лазеров // Теплофизика и аэромеханика. 2001. Т. 8, № 4. С. 571-587.
3. Shwartz J., Wilson G.T., Avidor J. Tactical High Energy Laser // Proc. of SPIE, 2002. Vol. 4632 (XIV Intern. Symp. on Gas Flow, Chem. Laser and High-Power Laser, Wroclaw, Poland, 2002).
4. Александров Б.П., Башкин А.С., Безноздрев В.Н., Парфеньев М.В., Пирогов Н.А., Семенов С.Н. Проблемы создания автономных мобильных лазерных установок на основе непрерывного химического DF-лазера // Квантовая электроника. 2003. Т. 33, № 1. С. 25-30.
5. Борейшо А.С., Дружинин С.Л., Мальков В.М., Киселев И.А., Морозов А.В., Орлов А.Е., Савин А.В., Шаталов И.В., Запругаев В.И., Соболев А.В. Система восстановления давления HF/DF-лазера большой мощности: опыт реализации // Теплофизика и аэромеханика. 2007. Т. 14, № 4. С. 591-607.
6. Malkov V., Boreysho A., Savin A. High-power supersonic chemical lasers: gas-dynamic problems of operation of mobile systems with PRS (invited paper) // Proc. of SPIE. Vol. 7131. P. 713103-1-713103-11. (XVII Intern. Symp. on Gas Flow, Chem. Laser and High-Power Laser, Lisboa, Portugal, 2008).
7. Vetrovec J. Chemical oxygen-iodine laser with a cryosorption pump // Proc. of SPIE. Vol. 4184. P. 60 (XIII Intern. Symp. on Gas Flow, Chem. Laser and High-Power Laser, Florence, Italy, 2000).
8. Malkov V., Kiselev I., Savin A. Diffusers of COIL and DF-lasers // Proc. of SPIE, 2005. Vol. 5777. P. 164-169. (XV Intern. Symp. on Gas Flow, Chem. Laser and High-Power Laser, Prague, Czech Republic, 2004).
9. Lohn P., Chan W., Haflinger D., Fink S., Behrens H., Plumer D., Buonadonna V., Walter R. COIL laser diffuser design // AIAA Paper. No. 2001-3010. 2001.
10. Абрамович Г.Н. Прикладная газовая динамика. М.: Наука, 1976. 888 с.
11. Malkov V.M., Savin A.V., Trilis A.V., Druzhinin S.L. One-stage free-vortex aerodynamic window with pressure ratio 100 and atmospheric exhaust. Proc. of SPIE, 2005. Vol. 5777. P. 170-174. (XV Intern. Symp. on Gas Flow, Chem. Laser and High-Power Laser, Prague, Czech Republic, 2004).
12. Борейшо А.С., Савин А.В., Мальков В.М., Игнатьев А.А., Федотов А.В. Вычислительное моделирование газодинамических процессов в системах восстановления давления сверхзвуковых химических лазеров // Теплофизика и аэромеханика. 2001. Т. 8, № 4. С. 639-646.
13. Борейшо А.С., Мальков В.М., Савин А.В., Васильев Д.Н., Евдокимов И.М., Трилис А.В., Страхов С.Ю. 12-киловаттный непрерывный химический кислородно-йодный лазер // Квантовая электроника. 2003. Т. 33, № 4. С. 307-311.
14. Ktalkherman M.G., Malkov V.M., Ruban N.A. Experimental investigation of GDL diffusers // AIAA Paper. No. 90-1512. 1990.
15. Dutton J.C., Mikkelsen C.D., Addy A.L. A Theoretical and Experimental Investigation of the constant area, supersonic-supersonic ejector // AIAA J. 1981. Vol. 20, No. 10. P. 1392-1400.
16. Singhal G., Rajesh R., Mainuddin, Tyagi R.K., Dawar A.L., Subbarao P.M.V., Endo M. Two-stage ejector based pressure recovery system for small scale SCOIL // AIAA Paper. No. 2005-5171. 2005.

*Статья поступила в редакцию 26 ноября 2009 г.,  
после доработки 9 июня 2010 г.*