

УДК 621.3:533.697

## Эжекторы для систем восстановления давления сверхзвуковых химических лазеров

В.М. Мальков<sup>1,2</sup>, И.А. Киселев<sup>2</sup>, И.В. Шаталов<sup>1</sup>, А.А. Дук<sup>1</sup>,  
А.В. Емельянова<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup>БГТУ «Военмех» им. Д.Ф. Устинова, Санкт-Петербург

E-mail: v.m.malkov@gmail.com

Приведены результаты численного исследования характеристик сверхзвуковых эжекторов с разными типами сопловых устройств. Работа проводилась в целях разработки эффективного эжектора для систем восстановления давления сверхзвуковых химических лазеров. Особенностью работы эжектора в составе систем восстановления давления является то, что в этом случае смешивающиеся эжектирующий и эжектируемый газы имеют разные термодинамические свойства, а коэффициент эжекции зависит от отношения температур и молекулярных весов этих газов. Поскольку в основе работы эжектора лежит процесс смешения, то задача состояла в интенсификации этого процесса с помощью сопловых устройств особой геометрии. Эффективность эжекторов оценивалась по интегральному параметру — произведению коэффициента эжекции на степень сжатия. Расчеты трехмерного течения вязкого газа в канале эжектора выполнялись с помощью программного пакета ANSYS. При выполнении верификации численной модели проводилось сравнение с экспериментальными данными, полученными ранее на модельной эжекторной установке и при испытании реальных систем восстановления давления со сверхзвуковыми химическими лазерами.

**Ключевые слова:** сверхзвуковые эжекторы, сопловые устройства, многосопловые эжекторы, параметрические численные исследования, коэффициент эжекции, степень сжатия, сверхзвуковые химические лазеры, системы восстановления давления, экспериментальные данные, верификация.

### Введение

Эжектор был изобретен достаточно давно — первые аэродинамические трубы фактически являлись трубами эжекторного типа. Сегодня он является не только частью выхлопной системы аэродинамических труб и испытательных высотных стендов, но широко используется и в промышленности (например, сталеплавильные котлы вакуумируют с помощью 5-ступенчатых паровых эжекторов). Исследований на тему эжекторов проводилось много (см., например, [1]). Было написано основное уравнение эжекции [2], изучены критические режимы работы эжектора [3, 4], получены эмпирические данные по выбору его геометрии. Теория эжекторов была развита в рамках интегральных моделей. Провести регулярные параметрические исследования по оптимизации такого сложного в геометрическом плане устройства, как эжектор, в рамках одномерных моделей, конечно, нельзя.

Газовый эжектор — это устройство, где кинетическая энергия высоконапорного эжектирующего (или активного) потока в процессе смешения передается низконапорному (пассивному) эжектируемому газу. В результате полное давление в потоке после смешения  $P_{03}$

получается выше, чем начальное давление в эжектируемом газе —  $P_{02}$ . Достижимая степень сжатия  $\varepsilon = P_{03}/P_{02}$  — одна из характеристик эжектора. При больших  $\varepsilon$  расход эжектирующего газа  $G_{01}$  становится больше расхода эжектируемого  $G_{02}$ , т.е. коэффициент эжекции  $n = G_{02}/G_{01} < 1$  является другой важной характеристикой эжектора. Поскольку всегда существует необходимость экономить высоконапорный газ — снижать  $G_{01}$ , то повышение эффективности эжектора можно определить как увеличение  $n$  для заданной степени сжатия  $\varepsilon$  при заданном расходе  $G_{02}$ .

Классическая конструктивная схема эжектора бывает двух видов: центральная, которая имеет одно осесимметричное сопло активного газа по оси трубы на входе в камеру смешения, либо периферийная, с кольцевым соплом по обечайке камеры смешения. Так как в основе работы эжектора лежит процесс смешения, при котором передается импульс от высоконапорного газа к эжектируемому, то улучшение работы эжектора может быть достигнуто путем интенсификации этого процесса. Экспериментальные работы на эту тему появлялись и ранее, обычно интенсификация происходила за счет модифицирования сопла активного газа. В работе [5] интенсификация смешения достигалась за счет использования насадок на периферийное сопло, а в работе [6] — за счет подачи эжектирующего газа со стенок камеры смешения через большое количество малоразмерных сопел. Повышение степени сжатия  $\varepsilon$  достигалось, но при очень низком  $n$ , так что обобщающий параметр  $n \cdot \varepsilon$  составлял всего  $\approx 0,5$  [6] (параметр  $n \cdot \varepsilon$  удобно использовать для сравнения эффективности работы разных эжекторов).

Подробно исследовать работу эжектора исключительно опытным путем на основании измерения полей давления в некоторых сечениях камеры смешения [7] с тем, чтобы оптимизировать его характеристики, представлялось, конечно, затруднительным. Тем более трудно было визуализировать сложное трехмерное течение. Сегодня результаты численного моделирования на основе трехмерных вязких уравнений позволяют получать реалистичную картину течения в любом ракурсе и в любом сечении камеры смешения. Благодаря этому достаточно легко разобраться во всех деталях процесса смешения и улучшить работу эжектора за счет подбора правильной геометрии как камеры смешения и горла эжектора, так и самого соплового устройства.

Сегодня появился класс задач, которые требуют для своего решения разработки особо эффективных эжекторов ( $n \cdot \varepsilon \approx 2$ ). Речь идет о сверхзвуковых химических лазерах (СХЛ) как наиболее вероятных кандидатах для реализации автономных мобильных лазерных комплексов мегаваттного уровня мощности [8–10]. В резонаторной полости СХЛ необходимо создание сверхзвукового потока при низком статическом давлении ( $P_{st} \approx 10$  Торр при числах Маха потока  $M \approx 2$ ). Поэтому для организации непрерывной работы СХЛ по открытому циклу (выхлоп в атмосферу) используют специальные выхлопные системы — системы восстановления давления (СВД). Основными частями СВД являются выхлопной диффузор и эжектор (в неё могут входить также теплообменник и переходная емкость перед эжектором, где размещена система, обеспечивающая сход эжектора с рабочего режима) [11–14]. СВД с системой хранения компонент для работы газогенераторов, питающих эжектор, во многом определяет массогабаритные характеристики всего лазерного модуля, состоящего из лазера и СВД. Задача уменьшения этих характеристик модуля — одна из ключевых при реализации мобильного комплекса. Поэтому массогабаритные характеристики модуля во многом являются определяющими при подборе конкретного СХЛ для мобильного комплекса. Наиболее заметно уменьшить массу и габариты модуля может повышение эффективности работы эжектора — снижение его расхода для заданной  $\varepsilon$ . Данное обстоятельство и определяет актуальность задачи о разработке эффективного эжектора.

В настоящей работе рассматриваются сверхзвуковые эжекторы с разными типами сопловых устройств, в том числе и многосопловые. Характеристики эжекторов анализируются по результатам численных параметрических исследований. Расчеты представляют интерес для определения возможности использования этих эжекторов в СВД СХЛ, поэтому рассматривались в основном случаи, когда эжектирующий (активный)

и эжектируемый (пассивный) газы были горячими и имели разные физические свойства. При этом понятно, что полученные результаты по определению геометрии сопловых устройств эжектора имеют общее значение.

### 1. О численной модели и ее верификации

Газовый эжектор является многопараметрическим устройством, сложным с конструктивной точки зрения. Понятно, что создание таких устройств является многоэтапным процессом [12]. На первом этапе — стадии эскизного проектирования — выбираются основные конструктивные решения, определяется геометрия канала, оцениваются его основные характеристики. На этой стадии используются простые полуэмпирические интегральные модели. На следующем этапе с целью оптимизации формы канала осуществляются параметрические исследования на основе трехмерных расчетов вязких течений, т.е. проводятся серии расчетов при последовательном варьировании главных параметров канала — типа соплового устройства, степени поджатия, длины пилонов, длины самого канала и т.д. Условием реалистичности трехмерных расчетов и получаемых характеристик является использование верифицированной численной модели.

В представленной работе численные исследования проводились с помощью программного пакета ANSYS. В качестве модели турбулентности использовалась модель SST. Для окончательной проверки работоспособности численной модели в ходе выполнения верификации проводилось сравнение полученных результатов с имеющимися экспериментальными данными.

Верификация — понятие комплексное. Поскольку нет единой теории турбулентности, надо подбирать подходящую для конкретного типа задач модель турбулентности. При рассмотрении сложных задач необходимо и определение моделей тех физических явлений, которые будут учитываться в данной задаче (например, когда речь идет о расчете течения в сопле химического лазера к уравнениям газовой динамики присоединяется блок химической кинетики). Для таких сложных объектов, как СХЛ с СВД, необходима выработка определенной стратегии расчетов. Задачу приходится делить на ряд подзадач (областей), следовательно надо определять условия согласования и «сшивания» решений, задавать граничные и начальные условия для разных областей и т.д. Выбор расчетных областей диктуется конструктивными особенностями самого устройства, а выбор расчетных сеток — особенностями течений на данном участке канала.

На рис. 1 в качестве примера демонстрируется влияние выбора сетки на результат расчета. Здесь показано смешение двух потоков на выходе из центрального сопла эжектора 1 (выделено сечение в расчетном секторе осесимметричного канала эжектора). Если

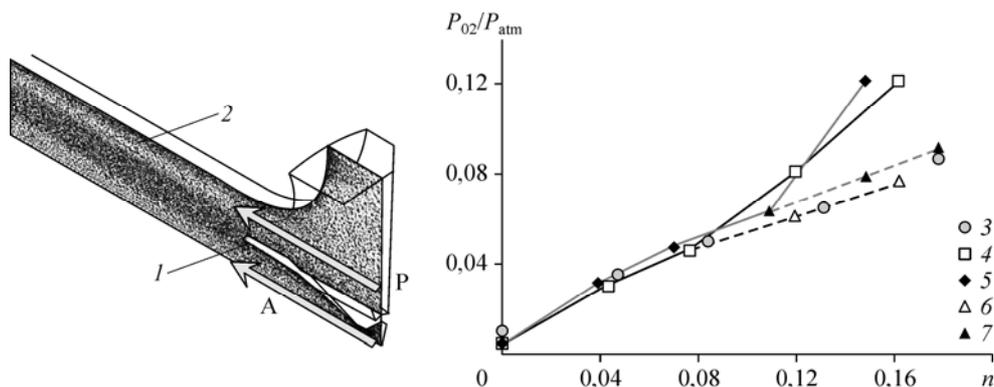


Рис. 1. Влияние выбора сетки на результаты расчета.

1 — центральное сопло, 2 — область смешения активного (А) и пассивного (Р) потоков,  
3 — экспериментальные данные, полученные в ИТПМ СО РАН, 4, 5 — расчетные точки  
при отсутствии сгущения сетки в области 2; 6, 7 — расчетные точки при наличии сгущения сетки;  
серии символов 4–7 — разные варианты сеток;

$P_{02}$  — давление перед входом в ЭЖ,  $P_{атм}$  — давление на выходе (атмосферное).

выбрано сгущение сетки только в пограничном слое, то расчетные точки 4, 5 на нагрузочной кривой  $\varepsilon = f(n)$  отходят от экспериментальных точек 3 при росте нагрузки  $G_{02}$  (расхода эжектируемого потока), т.е. при увеличении  $n$ . Добавление сгущения сетки в области смешения двух потоков 2, т.е. в области больших градиентов, позволяет получать численные результаты 6, 7 которые соответствуют эксперименту.

При верификации также проводятся исследования сходимости полученного решения по сетке. Однако главным критерием истинности теоретических результатов является их соответствие опытным данным. Поэтому в случае решения задач в новых областях, с учетом новых явлений, для которых отсутствуют литературные данные, приходится создавать специальные модельные лабораторные установки для проверки и отладки расчетной методики, на основании которой будет разрабатываться масштабная натурная установка. При этом разработка и испытание модельных устройств представляют собой отдельный этап в реализации проекта. Он необходим не только для получения опытных данных для верификации, но и для проверки некоторых принципиальных конструктивных решений. При реализации сложных и масштабных проектов таких этапов (и модельных установок) может быть несколько.

В настоящем случае при верификации использовались результаты как ранее проведенных экспериментов с СВД разных типов [11–14], так и данные, полученные на отдельной модельной эжекторной установке. Этот лабораторный стенд был подробно описан в работе [12], там же приведено описание процедуры верификации. Отметим лишь самое главное. Эжектор запитывался от специального парогазогенератора, работавшего на продуктах сгорания — спирта и воздуха. В продукты сгорания впрыскивалась вода. Это позволяло не только менять температуру эжектирующего газа, но и снижать его молекулярный вес:  $T_{01}$  изменялась в диапазоне 1000–1400 К, давление в форкамере  $P_{01} = 20\div 40$  атм, а  $\mu = 24\div 25$  г/моль. Эжектор был выполнен по центральной схеме. В опытах использовалось несколько сопел с расчетным числом Маха  $M = 4,45\div 4,76$ . Пассивный поток нарабатывался отдельным генератором модельного газа. Этот генератор работал на продуктах сгорания метана с кислородом, которые разбавлялись гелием и азотом. Такой способ позволял получить горячий поток с большим количеством гелия и, соответственно, с низким молекулярным весом ( $\mu = 9$  г/моль). Дело в том, что  $\mu$  рабочей среды химического HF/DF- лазера имеет примерно то же значение (лазерный газ разбавляется гелием и  $H_2$  или  $D_2$ ), а коэффициент эжекции зависит от отношения температур активного и пассивного потоков и от отношения их молекулярных весов. С помощью описанного генератора можно было моделировать работу эжектора в составе СВД для HF/DF-лазера (генератор описан в работе [15]:  $T_{02}$  модельного газа варьировалась от 1000 до 1500 К, расход газа составлял до 0,5 кг/сек, а  $\mu \approx 9$  г/моль.)

В работах [12–14] было продемонстрировано хорошее совпадение расчетных и экспериментальных данных. Совпадение получено не только для интегральных характеристик — нагрузочных кривых, но и для распределения статических давлений вдоль канала эжектора, что свидетельствует об адекватности теоретического описания реальных процессов. При проведении экспериментов на стенде решалась еще одна задача. Упомянутая выше зависимость  $n$  от температур и молекулярных весов газов, может быть выражена формулой:

$$n \approx n_{00} \sqrt{T_{\text{act}} / T_{\text{pas}} \cdot \mu_{\text{pas}} / \mu_{\text{act}}},$$

здесь  $n_{00}$  — приведенный коэффициент, когда в эжекторе пассивный и активный газы имеют одинаковые  $T$  и  $\mu$ . Эта зависимость была получена в работе [16]. Можно считать, что в формуле «разделена» газодинамика и термодинамика: под корнем записаны термодинамические параметры, а коэффициент эжекции  $n_{00}$  зависит только от геометрии канала, числа Маха сопла и давления в парогазогенераторе. При выполнении эскизного

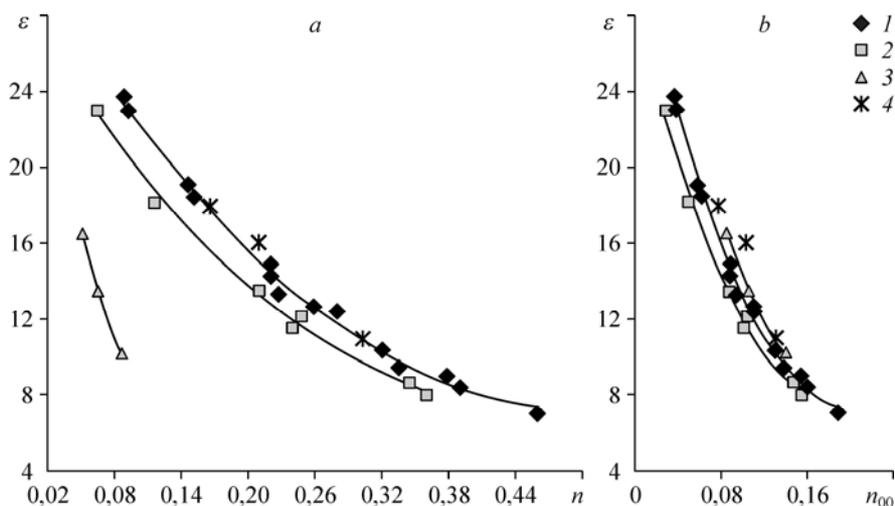


Рис. 2. Обобщение опытных данных для нагрузочных характеристик, когда активный и пассивный потоки в эжекторе имеют разные  $T$  и  $\mu$ . Зависимости  $\varepsilon$  от  $n$  при  $T_{01} = 1450$  (1), 1350 (2), 1300 (3) К, 1250 (4) и  $\varepsilon$  от  $n_{00}$ .

проектирования такие аналитические соотношения очень полезны. Вместе с тем представленная формула была получена в [16] из анализа одномерных уравнений и при определенных допущениях. Поэтому она вызывала некоторые сомнения и, следовательно, экспериментальная проверка формулы была желательна, поскольку в задачах с СВД для СХЛ имеет место тот случай, когда активный и пассивный газы в эжекторе имеют разные термодинамические свойства. Результаты проведенной проверки — экспериментальные данные и аппроксимационные зависимости — показаны на рис. 2. Здесь приведены зависимости степени сжатия  $\varepsilon$  от  $n$  для трех серий опытов с разной температурой эжектирующего газа:  $T_{01} \approx 1450, 1350$  и  $1300$  К. В первых двух сериях в качестве пассивного газа использовался холодный воздух, т.е.  $\mu_{\text{пас}} = 29$  г/моль. В серии экспериментов при  $T_{01} \approx 1300$  К пассивным был модельный газ с  $T_{02} \approx 1400$  К и  $\mu_{\text{пас}} = 9$  г/моль. Как видно, данные для  $\varepsilon$  при эжектировании легкого газа сильно отличаются. На рисунке также представлены результаты в виде зависимости  $\varepsilon$  от  $n_{00}$  (на графике нанесены точки 4 с  $T_{01} \approx 1250$  К, полученные на СВД, работавшей с реальным DF-лазером, они взяты из пуско-наладочных экспериментов с воздухом в качестве пассивного газа).

Таким образом, представленное соотношение позволяет обобщить данные для эжекторов одной геометрии, но работающих с газами, у которых термодинамические параметры разные. Формула является приближенной, в работе [16] ее точность оценивалась  $\approx 5\%$ . Разброс экспериментальных точек получился больше — на уровне  $10\div 15\%$  (отчасти это связано с точностью определения температуры). Однако формула очень полезна при анализе работы лазерного комплекса с СВД. Она помогает на стадии эскизного проектирования определиться при выборе примерной области оптимальных параметров работы лазера совместно с СВД (расход эжектора СВД сильно влияет на массогабаритные характеристики комплекса).

## 2. Интенсификация смешения как способ увеличения эффективности работы эжектора

Способы интенсификации можно подразделить на пассивные и активные.

**Пассивные способы.** В этом случае на сопле классической компоновки — периферийной или центральной — крепятся либо различного рода насадки [5], отклоняющие

эжектирующий поток так, чтобы увеличить поверхность его смешения с эжектируемым, либо вихреобразователи [17, 18], размещаемые для создания дополнительной завихренности в потоке. Так, в работе [5] периферийное сопло сразу на выходе продолжено цилиндрическим насадком с продольными щелями (рис. 3). Как отмечалось, трехмерные расчеты позволяют показать всю газодинамическую структуру потока в деталях: на рисунке представлена картина течения (поля чисел Маха) в расчетном секторе и в одном из сечений камеры смешения. На основании полученных изображений легко объяснить работу такого насадка (чего не получилось сделать в работе [5]): в щелях часть потока разворачивается, в результате чего поверхность смешения получается сложной. При развороте поток разгоняется до больших чисел Маха (до  $M \approx 5$ ), возникает большое разрежение, благодаря чему такой эжектор обеспечивает повышенные степени сжатия  $\varepsilon$  при небольших расходах пассивного газа. Однако при развороте в щелях в активном потоке происходят большие потери полного давления, а главное, отдельные струи из щелей направлены фактически друг на друга, и в результате суммарный импульс эжектирующего потока гасится. В этом причина получения низких коэффициентов эжекции.

Большие значения  $n$  недостижимы и при подаче эжектирующего газа со стенок камеры смешения через большое количество малоразмерных сопел [6]. Причины практически те же. Кроме того, использовать такую конструкцию для СВД, т.е. при работе с горячим газом при большом давлении, вряд ли получится. Как следует из результатов работы [6], максимальные значения параметра  $n_{00} \cdot \varepsilon$  составляют примерно 0,5. Этого совершенно недостаточно для эжектора СВД, т.к. при эжектировании горячего потока с низким  $\mu$  значения  $n$  окажутся совсем низкими (коэффициент пересчета, например, в случае СВД для HF/DF-лазера составит  $\approx 0,6$ ). Таким образом, требуются другие решения. Увеличение поверхности смешения необходимо, но «затраты» импульса активного потока на развитие этой поверхности должны быть минимизированы, т.е. углы отклонения потока при использовании какого-либо устройства или насадка должны быть небольшими.

В качестве элементов, искривляющих поверхность смешения, в работах [17, 18] были предложены вихреобразователи в виде шевронов или табов (рис. 4), представляющие собой пластины треугольной или квадратной формы, расположенные по кромке центрального сопла, внутренняя поверхность которых продолжает поверхность сопла, а может быть и отклонена под небольшим углом в поток. На рисунке приведена фотография моделей, испытанных на маломасштабной эжекторной установке в ИТПМ СО РАН [18].

Механизм интенсификации смешения очевиден из результатов численной визуализации течения в камере смешения. На рис. 5 показаны распределения параметров (в данном случае массовой доли эжектирующего газа) в сечениях вдоль камеры для двух вариантов: при наличии у центрального сопла (рассчитанного на  $M = 4,6$ ) вихреобразователей и в их

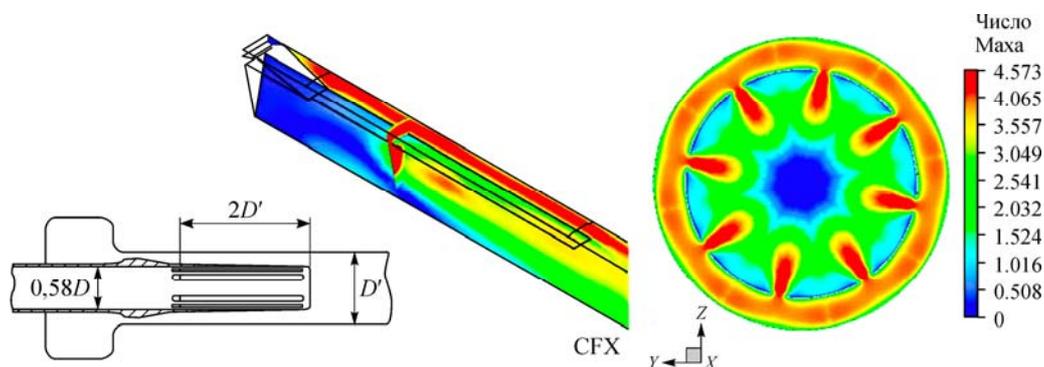


Рис. 3. Поля чисел Маха в камере смешения эжектора периферийной схемы при использовании сопла со щелевым насадком: радиальное сечение в расчетном секторе и поперечное — в зоне насадки.

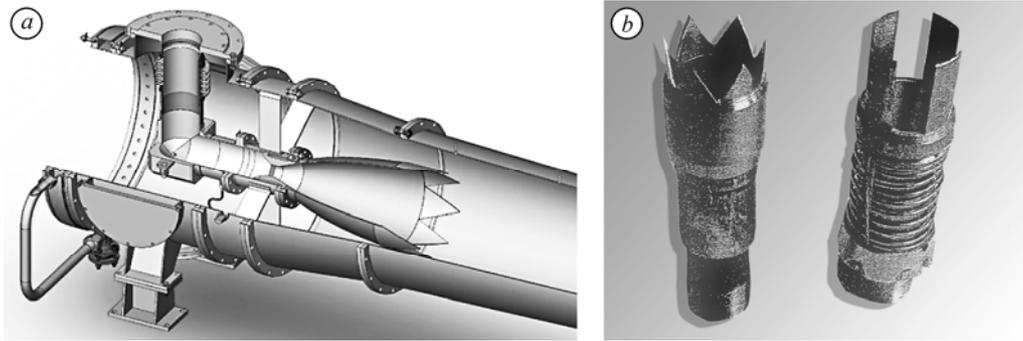


Рис. 4. Центральное сопло, снабженное шевронами (а), модели испытанных сопел (б).

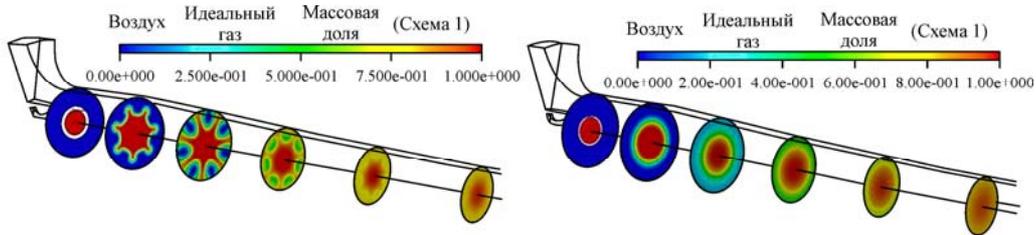


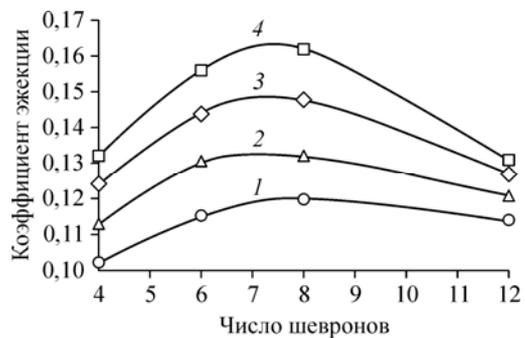
Рис. 5. Сравнение полей течения в камере смешения за центральным соплом с шевронами и без них.

отсутствие. В первом случае наблюдается более развитая поверхность смешения и поэтому смешение потоков происходит быстрее. В экспериментах (на холодном воздухе) увеличение коэффициентов эжекции при использовании табов составляло примерно на  $\approx 15\%$  больше, чем в их отсутствие. На геометрически оптимизированном эжекторе (при определенном угле сужения и длине сужающейся камеры смешения, при соответствующей длине горла и степени поджатия) получены значения  $n_{00} \cdot \varepsilon \approx 2,0$  [18].

Результаты расчетов коэффициентов эжекции  $n$  при разных степенях сжатия  $\varepsilon$  и при варьировании числа шевронов показано на рис. 6. Оптимальное число шевронов — 6–7. Каждая точка на рисунке — результат трехмерного расчета эжектора соответствующей геометрии (параметры активного и пассивного потоков соответствовали характерным параметрам в СВД для HF/DF лазеров).

Расчеты при варьировании угла наклона таба (шеврона) показали, что оптимальным углом является нулевой: отклонение таба в сторону потока ведет к уменьшению  $n$ , т.к. появление препятствия в сверхзвуковом потоке порождает потери полного давления. Длину вихреобразователя  $L$  следует выбирать близкой к  $L/D \approx 0,5$  ( $D$  — диаметр сопла). Заметим, что использование табов ведет к сокращению зоны смешения, однако уменьшение длины камеры смешения получается небольшим, примерно 1–2 калибра. Кроме того, как показали эксперименты [18] и расчеты, применение вихреобразователей ведет к росту давления запуска эжектора.

Рис. 6. Коэффициенты эжекции для эжектора с центральным соплом при варьировании числа шевронов на обечайке, полученные в расчете.  
 $\varepsilon = 16,7$  (1), 15,4 (2), 14,3 (3), 13,4 (4).



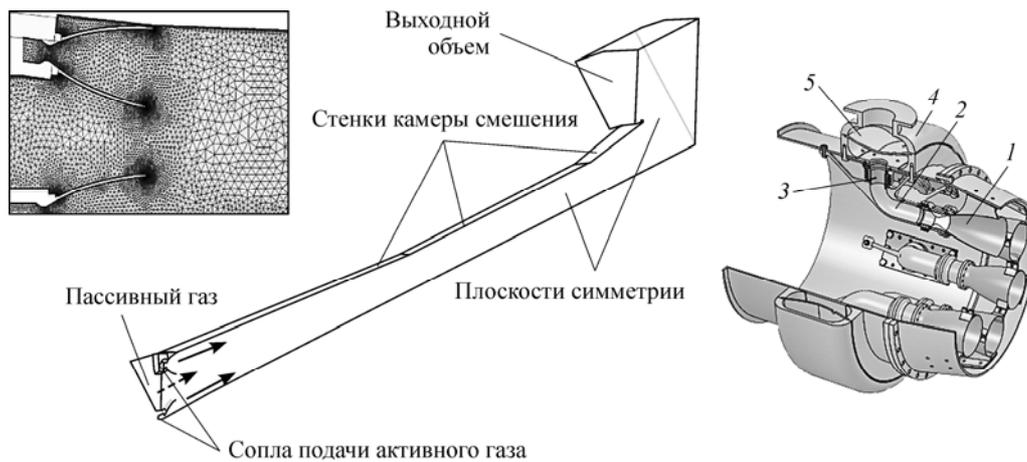


Рис. 7. Многосопловой эжектор: расчетный сектор (в центре), сетка (слева), конструкция (справа), состоящая из сопел (1), патрубков подачи газа (2), сифонов (3), общего коллектора подачи (4), перфорированной перегородки (сопротивление) для обеспечения равномерной раздачи высоконапорного газа по соплам (5).

Детальная картина течения на начальном участке звуковой струи, вытекающей из сопла с шевронами, описывалась в работе [19]. Были приведены результаты сравнения данных эксперимента с трехмерными расчетами и фактически проведена верификация пакета Fluent для данного класса задач.

**Активные способы.** Бóльшее увеличение поверхности смешения потоков без потери заметным образом общего импульса в системе можно получить, используя многосопловую конструкцию — расположив вместо одного большого центрального сопла несколько меньших сопел (равных по расходу центральному) по периферии канала на входе в камеру смешения. Поскольку характерный размер смешения — калибр — уменьшается, то можно ожидать, что в этом случае длину камеры можно будет сократить. На рис. 7 показаны расчетный сектор, пример расчетной сетки и основные элементы конструкции соплового блока эжектора, рассчитанного на работу в составе с СВД, т.е. с горячими газами. Задача по поиску оптимальных параметров многосоплового эжектора имеет большое число варьируемых переменных, и ее решать экспериментально, конечно, крайне трудоемко. В настоящих численных исследованиях варьировались следующие параметры: число сопел и их угол наклона к оси канала (этот параметр сильно влияет на величину давления запуска эжектора), длина камеры смешения и степень ее поджатия. В качестве начальной геометрии канала эжектора рассматривается ранее полученная геометрия оптимизированного канала эжектора с центральным соплом. На рис. 8 сопоставлены

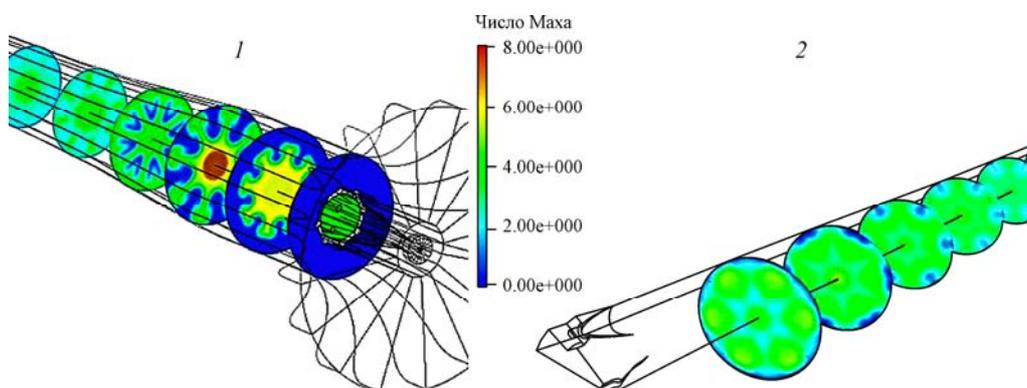


Рис. 8. Поля течений в камере смешения.

1 — центральное сопло с табами, 2 — многосопловой эжектор (7 сопел).

распределения чисел Маха в сечениях вдоль канала эжектора с центральным соплом, снабженным табами, и в канале многосоплового эжектора. Видно, что перемешивание потоков происходит во втором случае быстрее и, следовательно, камера смешения действительно может быть сокращена (течения рассчитывались в сужающихся камерах — поджатие составляло 1,8). Как известно [20], такие камеры обеспечивают лучшие характеристики эжектора, чем камеры постоянного сечения. Но в каналах с поджатием (как в диффузорах, так и в эжекторах) наблюдается явление гистерезиса: запуск канала эжектора при подъеме давления в форкамере сопла происходит при большем давлении, чем срыв течения при снижении давления (прямой ход отличается от обратного и  $P_{\text{зап}} > P_{\text{срв}}$ ). Поэтому ЭЖ с сужающейся камерой смешения может работать на разных режимах: на режиме запуска канала при нулевой нагрузке (без расхода пассивного газа) и на режиме с минимально возможным давлением перед соплом — предсрывной режим (при разной нагрузке). Конкретные данные по запуску и срыву эжектора центральной схемы были приведены в работах [12, 13]. Предсрывной режим является важнейшим для СВД — это наиболее эффективный режим работы эжектора, при котором обобщающий параметр  $n \cdot \varepsilon$  имеет максимальное значение (экономится расход активного газа).

На рис. 9 показаны нагрузочные характеристики многосопловых эжекторов с разным количеством сопел, соответствующие предсрывному режиму  $P_{01} = 25$  атм. По оси ординат отложено давление перед эжектором  $P_{02}$ , которое обеспечивается эжектором при данном расходе пассивного газа ( $P_{02}$  — величина, обратно пропорциональная  $\varepsilon$ ). По оси абсцисс отложено  $n/n_{\text{ном}}$ , где  $n_{\text{ном}}$  — коэффициент эжекции, на который рассчитывалась первоначальная геометрия канала эжектора в соответствии с интегральной теорией. На рис. 10 представлена зависимость  $P_{02}$  от числа сопел при разных значениях  $n/n_{\text{ном}}$  ( $n/n_{\text{ном}} = G_2/G_{\text{ном}}$ ). Как видно, для достижения максимальных  $n$  большого количества сопел не требуется, достаточно семи. Полученные результаты сравниваются с данными для эжектора с одним центральным соплом (см. 1 на рис. 9). В расчетах параметры пассивного газа имели значения:  $T_{02} \approx 600$  К и  $\mu_{\text{pas}} = 6,5$  г/моль (один из вариантов рабочего газа HF/DF-лазера), а в качестве эжектирующего использовался парогаз с  $T_{01} = 1300$  К. Обращает на себя внимание большая устойчивость многосопловых эжекторов к нагрузкам: характеристика остается линейной даже при нагрузке, в два раза превышающей номинальную. Увеличение  $n$  при заданной степени сжатия  $\varepsilon$  по сравнению с традиционным эжектором составляет примерно 35–40 % (в районе  $n = n_{\text{ном}}$ ). Известно, что эффективность эжектора растет при увеличении степени поджатия камеры смешения, но в этом случае растет и давление  $P_{\text{зап}}$ , что не всегда приемлемо. Окончательный выбор параметров эжектора зависит и от конкретных условий технического задания. Следует отметить, расчетные значения  $P_{\text{зап}}$  получаются обычно завышенными, и эта величина нуждается в экспериментальной проверке.

Из результатов, представленных на рис. 9, (в рассматриваемом случае срыв не происходит и при двойной нагрузке) следует, что основные геометрические параметры и соотношения начальной геометрии эжектора, которые определяются на основе интегральных расчетов, можно вычислять исходя из половины требуемого расхода. Это позволит уменьшить начальный диаметр канала эжектора в 1,4 раза и, соответственно, уменьшить длину камеры смешения.

На рис. 9, 10 показаны данные, полученные для эжекторов, у которых камера смешения имела длину  $L \approx 10$  калибров (за калибр суживающейся камеры берется средний диаметр), т.е. длина камеры выбиралась согласно традиционным рекомендациям для эжекторов [20]. При уменьшении длины камеры у многосопловых эжекторов характеристика не меняется, остается линейной, но сокращается рабочий диапазон нагрузок (срыв при росте нагрузки наступает быстрее). Расчеты показали, что можно уменьшить длину камеры до 5 калибров, т.е. наполовину, и в этом случае срыв произойдет при расходе немного большем номинального. Причем в отличие от этого процесса в традиционных

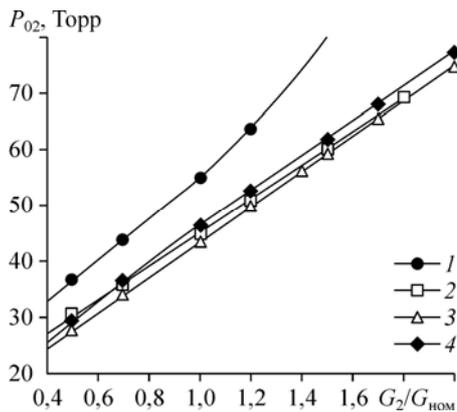


Рис. 9. Нагрузочные характеристики многосопловых эжекторов с разным числом сопел.

Количество сопел: 1 (1), 5 (2), 9 (3), 17 (4).

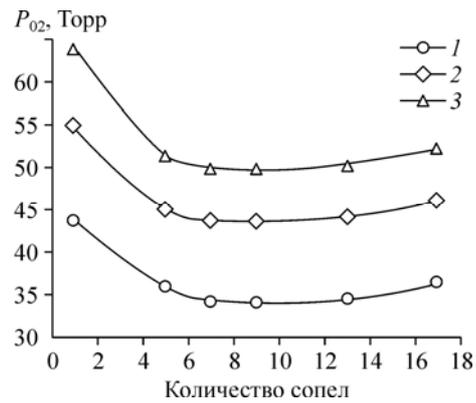


Рис. 10. Зависимость давления перед эжектором  $P_{02}$  от количества сопел эжектора при значениях  $G_2/G_{ном} = 0,7$  (1), 1 (2), 1,2 (3).

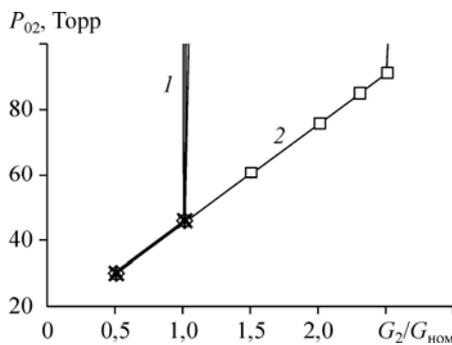


Рис. 11. Нагрузочная характеристика многосоплового эжектора с укороченными камерой смешения (КС) и горлом.

1: КС — 5 калибров, горло — 4 калибра;  
2: КС — 8 калибров, горло — 8 калибров.

эжекторах срыв течения происходит резко. На рис. 11 сравниваются срывные характеристики двух эжекторов: 1 — с коротким каналом, 2 — с длинным каналом.

Устойчивость многосопловых эжекторов к нагрузкам — полезная характеристика для сверхзвуковых аэродинамических труб. Последние, как правило, рассчитаны на работу в широком диапазоне изменения расходов (разные числа Маха определяют разную величину критических сечений сопловых вставок) и рабочих параметров. СВД, напротив, рассчитываются на один (оптимальный) режим работы лазера, при котором последний выдает максимальную мощность. Поэтому важным преимуществом многосопловых эжекторов по сравнению с традиционными для СВД является возможность существенно сократить длину эжектора и тем самым уменьшить габариты лазерного модуля.

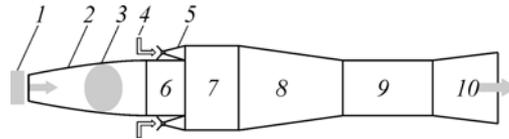
Численный эксперимент показал сильную зависимость давления  $P_{зап}$  многосопловых эжекторов от угла наклона сопел к центральной оси. В связи с этим конструкция должна включать в себя устройства для изменения этого угла (в небольших пределах  $\approx 3^\circ \div 4^\circ$ ), чтобы была возможность подстройки в процессе отладки эжектора, поскольку отличие расчетных значений угла от экспериментальных, безусловно, возможно. Его величина зависит от конкретной геометрии камеры: от угла наклона стенки (т.е. от выбора поджатия канала), от длины камеры и расстояния между соплом и стенкой.

### 3. Активный диффузор как эжекторная система

Еще одним типом эжекторов можно считать предложенный в работе [21] так называемый активный диффузор (АД) для СВД сверхзвуковых химических кислород-йодных лазеров (ХКЙЛ). СВД для лазерного модуля на базе ХКЙЛ первого поколения с выхлопом в атмосферу состоит из выхлопного (пассивного) диффузора и двухступенчатого сверхзвукового эжектора, что обусловлено очень низким давлением торможения лазерного

Рис. 12. Схема газодинамического канала лазера с СВД на базе АД.

1 — сопловой блок лазера, 2 — лазерная камера, 3 — резонатор, 4 — подача высоконапорного газа, 5 — сопловой блок АД со сверхзвуковыми соплами, 6 — сверхзвуковая диффузорная часть АД с активными пилонами, 7 — входной участок камеры смешения постоянного сечения ( $F = \text{const}$ ), 8 — участок камеры смешения с сужением, 9 — горло камеры смешения, 10 — дозвуковой диффузорный участок (поток направлен в эжектор).



газа на входе в диффузор. Уровень давления в тракте лазера, который задается генератором синглетного кислорода, является основным параметром, характеризующим технологию, по которой реализован комплекс. Для генератора струйного типа — наиболее распространенного устройства первого поколения — этот уровень перед соплами лазера составляет всего  $\approx 25\text{--}30$  Торр. Если комплекс предназначен для воздушного базирования, как, например, в реализованном проекте ABL [9], когда давление за бортом самолета составляет примерно 150 Торр, то в СВД достаточно одноступенчатого эжектора. Но в этом случае основной габарит лазерного комплекса задает эжектор. В ABL он составлял  $8\text{--}9$  м, что, конечно, много. Так для размещения лазера мощностью более 1 МВт потребовался Boeing-747.

Для сокращения габаритов СВД (одна из причин) и был разработан АД. Общая схема газодинамического тракта лазера изображена на рис. 12. Сразу за лазерной камерой с резонатором следует АД, который имеет собственно диффузорную часть с расположенными в ней короткими пилонами, затем сопловой блок АД и камера смешения.

На рис. 13 слева приведен общий вид одной из рассматриваемых в настоящей работе СВД, справа — разрез канала АД (показано расположение малоразмерных сопел в блоке и в пилонах). Данная система является двухканальной, эжекторная станция состоит из двух одноступенчатых эжекторов, питаемых парогазогенераторами. АД при общей ширине канала  $\approx 1$  м и высоте  $\approx 0,12$  м, имел длину  $L \approx 2,5$  м, что соответствует габаритам обычного пассивного диффузора. После АД следовала переходная емкость. Разворот канала на переходной емкости на  $180^\circ$  (а это дополнительные потери полного давления в потоке, что требует увеличения мощности эжектора, т.е. расхода) представляет собой чисто технический момент, связанный с размещением установки в конкретном боксе. Однако, кроме того, переходный объем — без поворота канала — нужен для облегчения запуска диффузора.

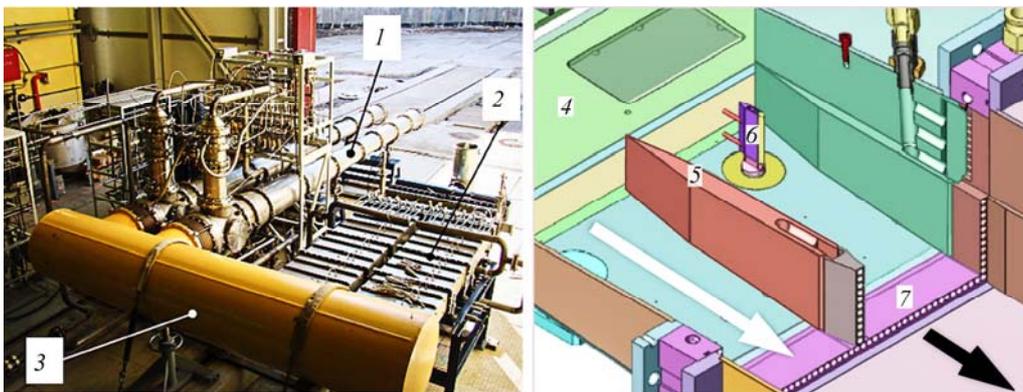


Рис. 13. СВД на базе АД для ХКЙЛ первого поколения.

1 — эжектора с парогазогенераторами, 2 — двухканальный АД, 3 — переходная емкость, 4 — лазерная камера, 5 — активный пилон, 6 — насадки полного давления, 7 — сопловой блок АД.

Конструкция соплового блока была выполнена так, что сопла располагались по периферии канала (рис. 13). Через них высоконапорный эжектирующий газ продувался вдоль стенок. Для уменьшения характерного размера зоны торможения сверхзвукового лазерного потока диффузорная часть АД делилась пилонами, которые тоже имели сопла и через них также выдувался эжектирующий газ. Получилась распределенная по сечению канала подача эжектирующего газа, которая фактически явилась объединением периферийной и центральной схем подачи газа, что позволило использовать относительно короткую камеру смешения, которая тоже делилась пилонами. По сути, АД — это объединение в одном устройстве выхлопного диффузора и прямоугольного эжектора. Короткие пилоны диффузорной части, имеющие длину  $L$ , примерно равную высоте канала, располагаются на выходе из лазерной камеры сразу после резонатора, где поток газа имеет скорость  $M \approx 2$ . На такой длине сверхзвуковой поток не успевает затормозиться, для этой цели требуется как минимум несколько калибров [22, 23]. Поэтому торможение потока происходит уже в камере смешения между струями эжектирующего газа. Таким образом, АД — это эжектор, работающий по схеме «сверхзвук–сверхзвук». Такие эжекторы были известны ранее [24], но их эффективность, как показали и расчеты авторов настоящей работы, ниже, чем у работающих по схеме «дозвук–сверхзвук». Тем не менее, СВД (рис. 13) на базе АД с одноступенчатым эжектором обеспечила выхлоп в атмосферу лазера первого поколения, и габарит модуля наземного базирования был резко сокращен по сравнению с обычной компоновкой (на длину второй ступени эжектора, близкую к 4,5 м).

Главная причина разработки АД заключалась в необходимости устранения отрицательного влияния пограничных слоев на стенках канала на параметры течения в лазерной камере. Дело в том, что из-за толстых пограничных слоев возникает явление так называемого «обратного влияния», когда при использовании обычного диффузора возмущения из дозвуковой области передаются назад в лазерную камеру несмотря на то, что поток в начале диффузора сверхзвуковой и этого не должно было бы быть. Однако возмущения передаются по дозвуковому пограничному слою. Эффект этот известен, с ним сталкиваются в опытах на аэродинамических трубах, когда поток имеет малые числа Рейнольдса. На рабочем режиме лазера из-за прогрева установки и роста температуры потока эффективность работы эжектора снижается и давление перед ним начинает расти, т.е. растет противодавление на выходе диффузора, что передается назад в лазерную камеру. Таким образом, статическое давление ( $P_{\text{стат}}$ ) в резонаторе начинает расти фактически с момента пуска. Этот факт регистрировался в опытах авторов [13, 14] и в работе [9].

Рост  $P_{\text{стат}}$  означает уменьшение числа Маха потока, что приводит к росту температуры газа и, соответственно, к росту населенности нижнего лазерного уровня, а значит к снижению мощности лазера. Кроме того, рост противодавления на выходе диффузора ведет к тому, что область торможения сверхзвукового потока с косыми ударными волнами, так называемый псевдоскачок, смещается в область резонатора. Ударные волны, падая на стенку, утолщают пограничный слой и вызывают его отрывы [20]. Это, во-первых, ведет к дальнейшему уменьшению эффективного сечения канала, т.е. поток еще больше тормозится и, соответственно, снижается мощность лазера. А во-вторых, появление ударных волн в резонаторе, плоскость которых параллельна оптической оси, означает ухудшение оптического качества потока: оптические пути в поле резонатора становятся разными, волновой фронт излучения искривляется, что приводит к увеличению расходимости лазера. Еще одна причина появления скачков уплотнения в области резонатора также связана с пограничным слоем. Поскольку в потоке лазерного газа сразу за соплом в зоне смешения йода с синглетным кислородом происходит тепловыделение, то стенки лазерной камеры после соплового блока приходится делать расширяющимися (в канале постоянного сечения сверхзвуковой поток при подводе тепла «запирается» [20]).

При том что начальный угол раскрытия камеры небольшой ( $\approx 3^\circ \div 4^\circ$  на сторону), это, как было показано в работе [25], приводит к отрыву пограничного слоя от стенок при низких числах Рейнольдса ( $Re \approx 10^3$ ). Данные отрывы также порождают дополнительные скачки уплотнения, плоскость которых тоже параллельна оптической оси, что ведет к ухудшению качества излучения [25].

Все возмущения плотности, которые появляются в потоке в резонаторной полости, механизм их возникновения и влияния на ухудшение качества излучения лазера достаточно подробно рассмотрены в работе [13]. В настоящем исследовании они отмечены, чтобы подчеркнуть, что основной причиной их появления являются газодинамические особенности течения и, прежде всего, пограничные слои на стенках канала. Поэтому главной целью конструктивного решения АД, о котором рассказано выше, было устранение отрицательного влияния пограничного слоя. Вдув тонкой струи высоконапорного газа из малоразмерных сопел вдоль стенок в пограничный слой стабилизирует его, уменьшает его толщину и устраняет эффект обратного влияния, т.е. параметры в лазерной камере уже не меняются во время режима. Кроме того, благодаря эжектирующему эффекту, который создает работающий сопловой блок перед собой, происходит отсос пограничного слоя со стенок камеры. Параметры потока в резонаторе не только стабилизируются, но еще и уменьшается общий уровень  $P_{\text{стат}}$ , т.е. растет число Маха и, следовательно, снижаются статическая температура потока и населенность нижнего лазерного уровня. Все это приводит к росту мощности и улучшению оптического качества потока [13, 14].

В работах [13, 14] внимание главным образом уделялось вопросу о том, как АД обеспечивает работу лазера и улучшает его характеристики. Теперь рассмотрим АД прежде всего как эжекторную систему, чтобы оценить значения характеристик, достижение которых позволило бы считать ее элементом технологии второго поколения и делало бы пригодной для реализации мобильного модуля на базе ХКЙЛ. Дело в том, что реализованные ранее авторами АД как эжекторы имели не слишком высокие характеристики. Хотя СВД, изображенная на рис. 13, и обеспечивала выхлоп лазера первого поколения (даже с очень низким давлением в тракте: перед соплами лазера оно составляло всего  $19 \div 20$  Торр) при общей степени сжатия потока в СВД  $\varepsilon \approx 70$  (АД+одноступенчатый эжектор), но непосредственно АД давал  $\varepsilon \approx 7$ , а интегральная характеристика АД получилась на уровне  $n \cdot \varepsilon \approx 1,4$ .

Для улучшения характеристики АД как эжектора нужно перевести его работу в стандартный режим «дозвук–сверхзвук». Это по сути означает доработку диффузорной части АД таким образом, чтобы на ее длине сверхзвуковой поток тормозился до дозвукового. Для потока обычного газа с  $M = 2$  требуется длина канала примерно  $7 \div 8$  калибров [22, 23, 26]. В рассматриваемом случае длина активных пилонов (рис. 13) не может быть заметно увеличена (при том что длина всего диффузорного участка  $\approx 1,5$  калибра), так как в результате теряется крайне важный для работы лазера эффект отсоса пограничного слоя со стенок лазерной камеры. Таким образом, требуется разработка сверхкороткого диффузора, работающего совместно с эжектором, причем все это должно представлять собой единое устройство, элементы которого будут оказывать взаимное влияние друг на друга, что, естественно, усложняет задачу.

Для сокращения физической длины зоны торможения необходимо уменьшить характерный размер канала — калибр. Достигнуть этого можно, разделив канал еще одним горизонтальным пилоном (в дополнении к существующим вертикальным), и получить, таким образом, «двухэтажную» диффузорную часть АД. Конструктивно это реализуемо, но ранее проведенные эксперименты [22, 23] показали, что введение горизонтального пилон

в прямоугольном канале может приводить к резкому росту давления запуска диффузора. В работах [22, 23] объяснение полученному эффекту дано не было. Настоящее трехмерное численное моделирование показало, что этот эффект связан с падением ударной волны от горизонтального пилона на пограничный слой на широкой стенке прямоугольного канала, отношение ширины которой к высоте составляет  $b/h \gg 1$ , что порождает отрыв пограничного слоя. Его отрыв именно по широкой стенке приводит к тому, что заметно сокращается эффективное проходное сечение канала диффузора. А так как поджатие канала, т.е. толщина пилонов, выбирается близко к максимально возможной величине, определяемой по интегральной теории из уравнения расхода, то при отрыве пограничного слоя поджатие становится больше максимально допустимого и поэтому давление запуска диффузора резко возрастает. Таким образом, для уменьшения характерного размера течения правильно делить канал диффузора именно вертикальными пилонами, чтобы ударные волны от пилонов падали на узкие стенки.

Однако расчеты показывают, что использовать горизонтальный пилон при определенной высоте канала можно. На рис. 14 представлены результаты расчетов трехмерных вязких течений в диффузорной части АД. На рис. 14а изображен канал без горизонтального пилона, на рис. 14б — с наличием горизонтального пилона, и его острый носок находится почти в одной плоскости с передними кромками вертикальных пилонов, на рис. 14с — горизонтальный пилон выдвинут вперед относительно вертикальных пилонов на  $x = 60$  мм (при высоте канала  $\approx 120$  мм). Вертикальными линиями указаны границы расположения вертикальных пилонов и показана звуковая линия. На рис. 14д представлена звуковая поверхность трехмерного течения для случая с — когда пилон выдвинут. Данные расчеты являются чисто модельными: поток — холодный воздух — с числом Маха  $M = 2$  на входе в диффузор, формируется одним плоским профилированным соплом; рассматривается течение без тепловыделения. Поэтому приведенные здесь цифры относительны — они отражают качественную сторону процесса. В первом случае давление запуска канала  $P_{\text{зап}} = 55$  Торр, а во втором (с пилоном) —  $P_{\text{зап}} \approx 60$  Торр. То есть, когда головной скачок от пилона падает на пограничный слой внутри диффузора, то условия на запуск ухудшаются по сравнению со случаем отсутствия пилона. Когда пилон выдвинут далеко вперед, так что головной скачок падает на широкую стенку перед диффузором, то запускная характеристика даже улучшается —  $P_{\text{зап}} = 50$  Торр. Для всех расчетных случаев противодействие, т.е. давление на выходе канала, было одинаковым:  $P_{\text{вых}} = 20$  Торр. В действительности в СВД уровень противодействия задается нагрузочной характеристикой эжектора: это то давление, которое обеспечивает эжектор на данном расходе

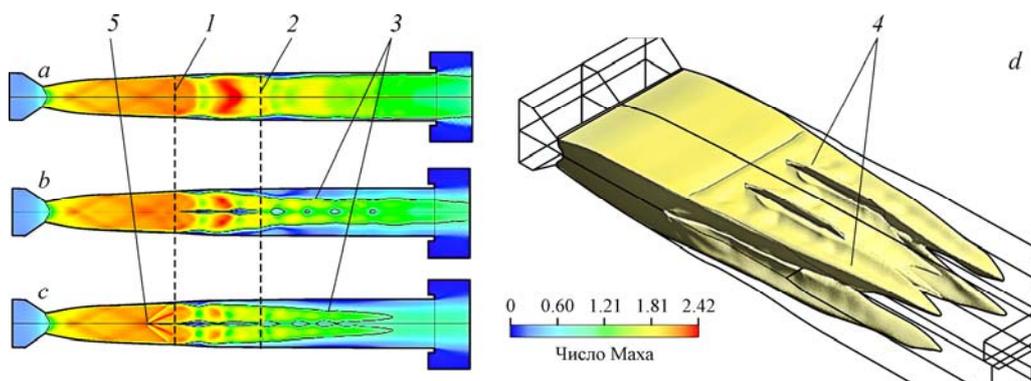


Рис. 14. Поля чисел Маха в диффузорной части АД.

а — канал без горизонтального пилона, б — горизонтальный пилон в одной плоскости с вертикальными пилонами, в — пилон выдвинут вперед на расстояние  $x = 60$  мм, д — звуковая поверхность для случая с выдвинутым пилоном (см. в); 1, 2 — начало и конец вертикальных пилонов, 3 — звуковая линия, 4 — звуковая поверхность, 5 — горизонтальный пилон.

пассивного газа, т.е. получить реальные цифры можно только рассматривая АД как единое целое.

Влияние горизонтального пилона на длину зоны торможения отражено изображенной на рис. 14 звуковой линией. Если на рис. 14а область сверхзвукового потока распространяется за расчетную область, то при наличии пилона (рис. 14б) зона торможения уже формируется в данном канале. А при выдвигении пилона (рис. 14с) она полностью формируется в расчетной области. Т.е. зона торможения резко сокращается, когда в канале присутствует горизонтальный пилон. Необходима только специальная его форма и особое расположение относительно вертикальных пилонов. Таким образом, задача о сверхкоротком диффузоре решается с учетом того обстоятельства, что в реальном лазерном потоке из-за наличия тепловыделения зона торможения, как показали опыты [27], сокращается минимум в два раза.

Очевидно, что оптимизация такого многопараметрического устройства, как АД, потребует большого количества расчетов, кроме того необходима и экспериментальная доводка. Оптимизированный вариант АД как эжектор должен обеспечить степень сжатия  $\varepsilon \approx 16 \div 17$  при достаточно хорошем коэффициенте эжекции  $n$ , таком, который гарантирует характеристику  $n \cdot \varepsilon \geq 2$ . Для достижения требуемой характеристики не следует использовать малоразмерные сопла, имеющие выходное сечение 6÷7 мм, как было сделано на первых модельных установках. Изначально в исследованиях исходили из соображения вдува высоконапорного газа непосредственно в пограничный слой. Расчеты течения в многосопловых эжекторах показывают, что для осесимметричного канала существует оптимальное число сопел (что и определяет их размер), которые располагаются по обечайке камеры смешения эжектора, и для смешения лучше, когда сопла не малоразмерные. В случае АД также существует оптимальный размер сопел, который тоже будет определяться конкретной геометрией лазерного канала.

Как отмечалось выше, уровень давления в газовом тракте лазера характеризует технологию в целом. Сегодня создано и отработано устройство нового поколения — генератор синглетного кислорода с закрученным аэрозольным потоком, который обеспечивает перед соплами лазера давление до 200 Торр [28]. Работоспособность ХКЙЛ при таких давлениях продемонстрирована в работе [29]. Удельная характеристика лазера по мощности хотя и снижается, но остается достаточно хорошей.

Важным условием полной реализации технологии второго поколения является разработка для лазера соплового блока эжекторного типа. Подобного типа блоки использовались в газодинамических лазерах на углекислом газе на смешении [30]. Фактически это задача еще об одном типе эжектора и поэтому о ней здесь следует упомянуть. Обычно второй компонент смеси — горячий газообразный йод с горячим азотом — в ХКЙЛ подается со стенок лопаток блока в транзвуковой области сопла перпендикулярно основному потоку кислорода [13]. Но это не является рациональным, потому что теряется импульс лазерного газа, а это неблагоприятно для работы СВД, так как растет потребная  $\varepsilon$ , которую СВД должна обеспечить при отрицательном влиянии такого способа инжекции на оптическое качество потока. Поэтому требуется организация подачи газа в сопло из дозвуковой зоны течения спутным образом с основным потоком. Первые версии эжекторных сопловых блоков [29] нельзя считать окончательным решением. Необходимо параметрическое исследование вариантов подачи газа и оптимизация всей геометрии блока. Эта задача на смешение, но более сложная, чем традиционный анализ работы эжектора: смешиваются два неравновесных и химически реагирующих потока. Причем у задачи своя специфика: нужно, чтобы выделение тепла, которое сопровождает протекание реакций, происходило за соплом, и необходимо обеспечить хорошее оптическое качество потока в резонаторной полости.

Сегодня можно с уверенностью утверждать, что технология второго поколения для создания мобильного комплекса на базе ХКЙЛ с приемлемыми массогабаритными

характеристиками реализуема. Конечно, требуется оптимизация всего газодинамического канала в целом, выбор оптимальных режимов работы модуля и его экспериментальная доводка. Но и сейчас ясно, что модуль воздушного базирования будет состоять только из холодного АД и его габариты будут почти в три раза меньше, чем у модуля AVL. Именно необходимость использования горячих эжекторов, являющиеся источником большого тепловыделения в AVL-модуле первого поколения, привела к техническим проблемам, которые не были преодолены.

### Заключение

Многосопловые эжекторы позволяют существенно улучшить характеристики эжекторных систем по сравнению с вариантами, когда эжектор разрабатывается на основе традиционных схем — центральной или периферийной. Увеличение коэффициента эжекции в этом случае (при фиксированной степени сжатия) может составлять около 50 %. Конкретная конструкция многосоплового эжектора определяется особенностями установки, для откачивания расхода которой он предназначен. При использовании в традиционных установках, например, в аэродинамических трубах, когда канал осесимметричный, не требуется применения большого количества сопел. Оптимальное число составляет 6–7 сопел, расположенных по обечайке камеры смешения.

Для задачи организации выхлопа сверхзвукового химического лазера, имеющего прямоугольный канал, решение получилось нетрадиционным. Был разработан прямоугольный эжектор с объединением центральной и периферийной схем подачи эжектирующего газа. Высоконапорный газ продувался вдоль стенок из сопел, расположенных по всей периферии канала, и из пилонов, которые делили короткую входную диффузорную часть на отдельные квадратные каналы. В одном устройстве, названном активным диффузором, были объединены выхлопной диффузор и эжектор. Решение определялось как прямоугольной геометрией канала, так и необходимостью стабилизировать течение в резонаторной полости за счет отсечения обратного влияния передаваемых по пограничному слою возмущений, которые возникают на выходе обычного пассивного диффузора. Проведенные численные эксперименты позволяют определить пути увеличения эффективности работы АД как за счет установки дополнительного горизонтального пилона в диффузорной части АД для реализации режима работы по схеме «дозвук–сверхзвук», так и за счет оптимизации количества и размеров сопел активного газа в АД. Система выхлопа на основе АД позволяет не только сократить габарит лазерного модуля почти в три раза по сравнению с традиционной компоновкой, состоящей из обычного выхлопного диффузора и эжектора, но и улучшить оптическое качество потока в резонаторе, что означает уменьшение расходимости излучения лазера, т.е. увеличение его дальности действия.

### Список литературы

1. Сборник работ по исследованию сверхзвуковых газовых эжекторов. М.: Изд-во ЦАГИ, 1961. 327 с.
2. Христианович С.А. О расчете эжектора // Промышленная аэродинамика: сб. ст. 1944. С. 3–17.
3. Миллиончиков М.Д., Рябинков Г.М. Газовые эжекторы больших скоростей // Сборник работ по исследованию сверхзвуковых газовых эжекторов. М.: БНИ ЦАГИ. 1961. С. 5–32.
4. Никольский А.А., Шустов В.И. Критические режимы газового эжектора больших перепадов давления // Сборник работ по исследованию сверхзвуковых газовых эжекторов. М.: БНИ ЦАГИ. 1961. С. 41–47.
5. Аркадов Ю.К. Газовый эжектор с соплом, перфорированным продольными щелями // Изв. АН СССР. МЖГ. 1968. № 2. С. 71–74.
6. Аркадов Ю.К. Компактный газовый эжектор большой степени сжатия с расположением сопел по спирали // Уч. зап. ЦАГИ. 1984. Т. XV, № 6. С. 35–42.
7. Аркадов Ю.К. Новые газовые эжекторы и эжекционные процессы. М.: Изд-во Физматлит, 2001. 336 с.
8. Александров Б.П., Башкин А.С., Безноздрев В.Н., Парфеньев М.В., Пирогов Н.А., Семенов С.Н. Проблемы создания автономных мобильных лазерных систем на базе непрерывных химических DF лазеров // Квантовая электроника. 2003. Т. 33, № 1. С. 25–30.

9. Koop G., Hartlov J., et al. Airborne laser flight-weighted laser module (FLM) and COIL modeling support // AIAA paper. 2000. № 2000–2421.
10. Shwarts J., Wilson G.T., Avidor J. Tactical High Energy Laser // SPIE Proceeding. 2002. Vol. 4632.
11. Борейшо А.С., Мальков В.М., Киселев И.А., Орлов А.Е., Савин А.В., Шалимов В.П., Хайлов В.Н. Системы восстановления давления мощных газовых и химических лазеров // Теплофизика и аэромеханика. 2001. Т. 8, № 4. С. 605–623.
12. Мальков В.М., Киселев И.А., Орлов А.Е., Шаталов И.В. и др. Система восстановления давления HF/DF лазера большой мощности: опыт реализации // Теплофизика и аэромеханика. 2007. Т. 14, № 4. С. 591–607.
13. Мальков В.М., Борейшо А.С., Савин А.В. Химический кислород-йодный лазер: аэрооптика и газодинамика // Инж.-физ. журнал. 2011. Т. 84, № 1. С. 57–73.
14. Мальков В.М., Киселев И.А., Орлов А.Е., Шаталов И.В. Система восстановления давления химического кислород-йодного лазера на базе активного диффузора // Теплофизика и аэромеханика. 2011. Т. 18, № 3. С. 397–411.
15. Борейшо А.С., Леонов А.Ф., Мальков В.М., Игнатьев А.А., Федотов А.В. Методика испытаний систем восстановления давления HF/DF НХЛ // Теплофизика и аэромеханика. 2001. Т. 8, № 4. С. 647–656.
16. Искра А.Л. Эжектор с разными эжектирующим и эжектируемым газами // Сборник работ по исследованию сверхзвуковых газовых эжекторов. М.: Изд. БНИ ЦАГИ, 1961. С. 303–321.
17. Пат. 2341691 РФ, МПК<sup>51</sup> F04F5/18, F04F5/44. Газовый эжектор. Соболев А.В., Запрягаев В.И., Мальков В.М.; заявитель и патентообладатель Ин-т теорет. и прикл. механики СО РАН, ООО НПП «Лазерные системы». № 2007100659/06; заявл. 09.01.2007, опубл. 20.12.2008, Бюл. № 20.
18. Соболев А.В., Запрягаев В.И., Мальков В.М. Применение насадок, шевронов и табов для улучшения расходных характеристик газовых эжекторов // Теплофизика и аэромеханика. 2007. Т. 14, № 2. С. 201–208.
19. Запрягаев В.И., Кавун И.Н., Киселев Н.П. Структура течения на начальном участке сверхзвуковой струи, истекающей из сопла с шевронами // Прикл. механика и техн. физика. 2010. Т. 51, № 2. С. 71–80.
20. Абрамович Г.Н. Прикладная газовая динамика. М.: Наука, 1991. 600 с.
21. Пат. 2609186, МПК<sup>51</sup> H01S3/0953. Газодинамический тракт непрерывного химического лазера с активным диффузором. Мальков В.М., Шаталов И.В., Дук А.А., Анисимова А.В., Спасский Н.В., Чакчир С.Я.; заявитель и патентообладатель ООО «НПП «Адвент». № 2015119199; заявл. 23.03.2015, опубл. 10.10.2016, Бюлл. № 28.
22. Ktaltherman M., Malkov V., Ruban N. Experimental investigation of GDL diffusers // AIAA Paper. 1990. No. 90-1512.
23. Кталхерман М.Г., Мальков В.М., Рубан Н.А. Влияние определяющих параметров на эффективность работы сверхзвуковых диффузоров прямоугольного сечения // Газодинамика проточной части ГДЛ. Новосибирск, 1987. С. 116–162.
24. 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. 2, No. 10. P. 1392–1400.
25. Bhowmik A., Yang T.T., Jones K. Optical phase distortion and beam quality in a high-power chemical oxygen–iodine laser // Paper submitted on SPIE meeting in San Jose. 1998.
26. Кталхерман М.Г., Мальков В.М., Рубан Н.А. Торможение сверхзвукового потока в прямоугольном канале постоянного сечения // Прикл. механика и техн. физика. 1984. № 6. С. 48–57.
27. Malkov V., Kiselev I., Savin A. Diffusers of COIL and DF-lasers // Proc. Of SPIE. 2004. Vol. 5777. P. 164–169.
28. Пат. № 2307434 РФ, МПК<sup>51</sup> H01S3/095, C01B13/02. Генератор синглетного кислорода. Бакшин В.В., Буряк Е.В., Выскубенко Б.А., Колобянин Ю.В. и др.; заявитель и патентообладатель Российской Федерации, ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ». № 2005131377/28; заявл. 10.10.2005, опубл. 27.09.2007, Бюл. № 27.
29. Адаменков А.А., Бакшин В.В., Выскубенко Б.А., Колобянин Ю.В. и др. Масштабируемый химический кислород-йодный лазер // Квантовая электроника. 2011. Т. 41, № 12, С. 1083–1086.
30. Borghi R., Charpenel M., Taran J.-P. Thermally pumped gasdynamics laser. Patent USA: US3882416(A).

*Статья поступила в редакцию 24 февраля 2016 г.,  
после доработки — 13 июля 2016 г.*