

УДК 621.3:533.697

## СИСТЕМА ВОССТАНОВЛЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ HF/DF-ЛАЗЕРА БОЛЬШОЙ МОЩНОСТИ: ОПЫТ РЕАЛИЗАЦИИ

А.С. БОРЕЙШО<sup>1</sup>, С.Л. ДРУЖИНИН<sup>1</sup>, В.М. МАЛЬКОВ<sup>1</sup>, И.А. КИСЕЛЕВ<sup>1</sup>,  
А.В. МОРОЗОВ<sup>1</sup>, А.Е. ОРЛОВ<sup>1</sup>, А.В. САВИН<sup>1</sup>, И.В. ШАТАЛОВ<sup>1</sup>,  
В.И. ЗАПРЯГАЕВ<sup>2</sup>, А.В. СОБОЛЕВ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>НПП Лазерные системы, Санкт-Петербург,

<sup>2</sup>Институт теоретической и прикладной механики  
им. С.А. Христиановича СО РАН, Новосибирск

Обсуждается методика создания эффективной системы восстановления давления (СВД) для HF/DF-лазера большой мощности. Предлагается последовательность этапов проектирования, включающая в себя оценки основных параметров с помощью одномерных интегральных и полуэмпирических методик, вычислительное моделирование с использованием нестационарных трехмерных уравнений Навье–Стокса, экспериментальное моделирование, необходимое для верификации расчетных методик и корректировки параметров, и натурный эксперимент. Разработана и создана система эжекторного типа, обеспечивающая восстановление давления в газодинамическом тракте с 12 Тор до атмосферного уровня при работе HF/DF-лазера, имеющего мощность несколько десятков киловатт. Проанализированы условия согласования параметров отдельных элементов, составляющих СВД, и функционирование СВД и непрерывного химического лазера в составе единого комплекса. Определены условия минимизации массогабаритных характеристик этого комплекса, необходимые при создании мобильных систем наземного базирования.

### ВВЕДЕНИЕ

Известно [1], что для работы непрерывного химического лазера (НХЛ) необходимо создание в рабочей камере лазера сверхзвукового потока при низком статическом давлении (менее 10 Тор при числах Маха от 2 до 4). Энергии такого потока не хватает для восстановления давления до атмосферного уровня и организации выхлопа отработанных газообразных продуктов лазерной смеси в окружающую среду с помощью только пассивных средств — сверхзвуковых диффузоров, как это было в газодинамических лазерах. Использование для выхлопа вакуумных емкостей, как это делалось в небольших лабораторных установках, для мощных сверхзвуковых химических лазеров (СХЛ) с большим расходом и достаточно продолжительным временем работы ( $10^1$ – $10^3$  с) невозможно. Для решения поставленной задачи необходим комплекс пассивных и активных средств повышения давления газового потока до требуемой величины. Схемно система восстановления давления (СВД) состоит из сверхзвукового диффузора (СД), обеспечивающего предварительное повышение давления в потоке и снижение его скорости до дозвуковой, переходной камеры, теплообменника (ТО) и эжектора (ЭЖ), который повышает давление до атмосферного уровня [2, 3]. Известные примеры реализации HF/DF-НХЛ с СВД показывают, что система восстановления давления вносит

определяющий вклад в массогабаритные характеристики комплекса, а удельная мощность лазерного комплекса с учетом расхода компонентов в СВД падает на порядок [2]. Поэтому оптимизация параметров как отдельных элементов, так и СВД в целом позволяет значительно повысить удельные выходные характеристики комплекса.

## 1. ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ

### Диффузор

Процесс торможения сверхзвукового потока в канале диффузора происходит в системе косых скачков уплотнения, возникающих в потоке при его газодинамическом или геометрическом поджатии [4, 5]. В [4] было показано, что в круглых трубах (при достаточно больших числах Рейнольдса) значение давления за этой системой скачков — давления восстановления — очень близко к величине давления за прямым скачком. Поэтому такая система косых скачков уплотнения называется псевдоскачком.

На основе соотношений для прямого скачка можно легко определить давления запуска и срыва, а также давление восстановления, которое зависит от геометрии канала (степени поджатия) сверхзвукового диффузора. Однако экспериментальные характеристики сверхзвукового диффузора и оценки, основанные на одномерной интегральной теории прямого скачка, близки только в случае, когда длина диффузора равна длине псевдоскачка, которая для каналов различной формы определяется с помощью обобщенной экспериментальной зависимости [5, 6]. В других случаях характеристики СД становятся хуже. Эта полуэмпирическая методика определения параметров СД хорошо работает не только для аэродинамических труб, но и для случая сверхзвукового диффузора газодинамического лазера (ГДЛ).

Однако такой простой метод определения параметров СД перестает работать в случае сверхзвуковых НХЛ. Основными причинами этого являются низкие числа Рейнольдса (как правило, на один–два порядка ниже, чем в аэродинамических трубах) и наличие тепловыделения в сверхзвуковом потоке лазерного газа, обусловленное химическими реакциями в случае HF/DF-НХЛ [2], а также проблема запуска канала сложной формы, состоящего из лазерной камеры с многосопловым блоком и резонаторными полостями и многосекционного диффузора [7].

### Эжектор

Как и для СД, на начальном этапе проектирования эжектора вполне достаточно расчетов, выполненных на основе одномерной невязкой теории с использованием уравнений законов сохранения в интегральной форме [8, 9], которые позволяют определять примерные геометрические размеры эжектора и параметры эжектирующего газа. Рассматривалась работа эжектора на критическом режиме, когда скорость течения эжектируемого газа в определенном сечении камеры смешения достигает скорости звука. В этом случае, согласно [8], эжектор при данном значении коэффициента эжекции обеспечивает наибольшее полное давление смеси газов, а при заданном полном давлении имеет наибольший коэффициент эжекции. Использовался эжектор с сужающейся камерой смешения, которая обеспечивает более высокое давление смеси, чем на выходе из цилиндрической камеры при тех же начальных параметрах газов [8]. На первом этапе ставилась задача определения расчетной области параметров оптимальных ЭЖ. Оптимизация проводилась по коэффициенту эжекции  $n = G_2/G_1$  ( $G_1$  — расход эжектирующего газа,  $G_2$  — расход

эжектируемого газа), варьировались скорости потоков (эжектирующего  $\lambda_1$ , эжектируемого —  $\lambda_2$  и скорость на входе в горло —  $\lambda_3$ ). Типичная зависимость  $n(\lambda_3)$  при разных степенях сжатия потока  $\varepsilon = p_\infty/p_{02}$  представлена в [3].

Основные особенности работы эжектора в составе СВД НХЛ связаны с тем, что в отличие от традиционной аэродинамики в эжекторах систем восстановления давления химических лазеров пассивным потоком является горячий газ с низкой молярной массой. Согласно [10], коэффициент эжекции  $n$  при условии, что активная и пассивная среды различны и имеют разные температуры, можно представить

в виде  $n = n_{00} \sqrt{\frac{\mu_n}{\mu_a}} \sqrt{\frac{T_a}{T_n}}$ , где  $n_{00}$  — коэффициент эжекции при условии, что температура

и состав активной и пассивной сред одинаковы,  $T$  — температура,  $\mu$  — молярная масса. Т. е. для повышения  $n$  необходимо снижать  $\mu$  и увеличивать температуру эжектирующего газа. В связи с этим в качестве активного газа обычно используется горячая парогазовая смесь, полученная в специальном газогенераторе [2].

### Теплообменник

Еще одной возможностью повысить коэффициент эжекции является снижение температуры пассивного газа с помощью установленного в газодинамическом тракте теплообменника [11]. При этом следует учесть, что известные методики теплового и гидравлического расчетов теплообменников адекватно работают только в определенной области параметров. Для НХЛ с низкими значениями плотности и чисел Рейнольдса в лазерном газе критериальные зависимости для гидравлических потерь и теплообмена могут быть использованы только на стадии оценок при выборе геометрии ТО, а для точного расчета параметров теплообменника также необходимо использовать численные методы.

Таким образом, на основе полуэмпирической одномерной теории определяются основные геометрические и газодинамические параметры составных элементов СВД. Эти оценки являются первым приближением для трехмерных расчетов, на основе которых выбираются окончательные размеры и уточняются характеристики СВД.

## 2. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Газодинамический канал СВД (рис. 1) для расчетов был поделен на основные характерные участки: лазерная камера со сверхзвуковым диффузором, теплообменник, эжектор. Трехмерные расчеты проводились с использованием стандартного пакета программ CFX фирмы AEA Technology Engineering Software Ltd. (UK). Находились решения полной системы нестационарных уравнений Навье–Стокса для сжимаемого газа, усредненных по методу Рейнольдса, при этом использовалась SST (Shear–Stress Transport) двухпараметрическая модель турбулентности, являющаяся разновидностью стандартной  $k-\omega$  модели Ментера.

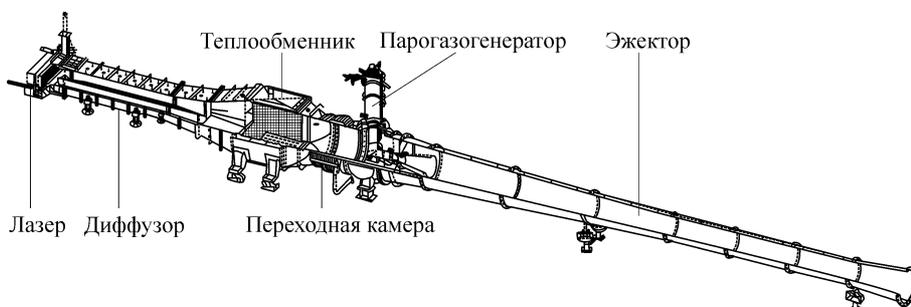


Рис. 1. Система восстановления давления HF/DF-лазера.

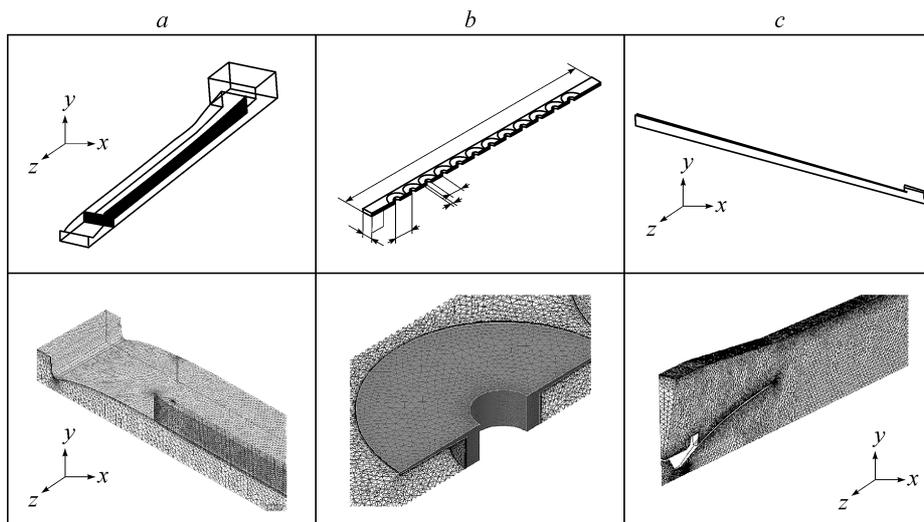


Рис. 2. Расчетные области и сетки.  
СД (а), ТО (b), ЭЖ (с).

Расчетные области представляли собой минимальные элементы симметрии основных участков СВД (рис. 2, *a* — геометрия СД: боковой канал, пилон и половина прилегающего к нему центрального канала, *b* — теплообменник, элемент трубы с ребром, *c* — сопло эжектора в канале).

При построении сеток с помощью сеточного генератора CFX применялось сгущение сетки у внешних стенок (пограничный слой) и в зонах с большими градиентами изменения параметров течения.

### Диффузор

Расчетная область для данной задачи представляла собой элемент симметрии диффузора с двумя перпендикулярными плоскостями симметрии (четверть от реальной геометрии). Область включает в себя один боковой канал диффузора и половину центрального канала, т. е. содержит один пилон (на основании предварительных оценок была выбрана схема трехсекционного диффузора с двумя пилонами). Расчет производился для заданного расхода лазерной смеси при следующих параметрах потока на входе в диффузор: молярная масса — 6,4 г/моль, температура торможения — 1200 К, число Маха — 2, полное давление — 100 Тор. Задача запуска диффузора решалась в нестационарной постановке с шагом по времени  $10^{-4}$  с. Для сверхзвукового диффузора определялись давления запуска и срыва, максимальное давление восстановления для двух значений степени поджатия (толщины пилонов: 17 и 28 мм были выбраны на основе предварительных оценок) и различного противодавления на выходе.

При проектировании лазерной камеры учитывались рекомендации [2, 3] по учету тепловыделения в отработавшем потоке лазерной смеси. Степень раскрытия лазерной камеры в соответствии с предварительными оценками равнялась 1,7. Расширяющиеся стенки лазерной камеры для обеспечения безотрывного течения профилировались дугой эллипса. Процессы, определяющие тепловыделение в HF/DF-лазере, успевают почти полностью завершиться до поступления лазерного газа в сверхзвуковой диффузор, и анализ течения в диффузоре может производиться без учета теплоподвода.

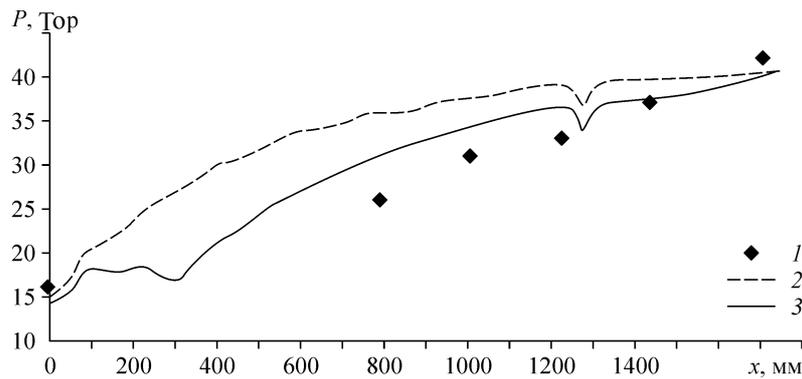


Рис. 3. Распределения давления вдоль диффузора HF/DF-лазера. Эксперимент (1), 3D-расчет, SST, (2), 3D-расчет,  $k-\omega$ , (3).

По интегральной теории для потока с числом Маха 2 допустимо поджатие 1,22. Как уже отмечалось, интегральная теория хорошо работает при больших числах Рейнольдса, когда влияние пограничных слоев невелико. Для чисел  $Re = 10^4 - 10^5$ , характерных для HF/DF-лазеров, нарастание пограничных слоев становится значительным и приводит к фактическому сужению проходного сечения в канале, поэтому допустимое поджатие получается меньше величины, определенной с помощью интегральной теории. В работе использовались пилоны толщиной 28 мм (поджатие 1,125).

На рис. 3 показано сравнение экспериментальных и расчетных данных для распределений давления вдоль канала диффузора химического DF-лазера. Численные результаты получены при использовании двух моделей турбулентности: SST и  $k-\omega$ . Как видно, в случае использования модели SST результаты расчетов (сплошные линии) совпадают с экспериментальными точками гораздо лучше.

Проведение серии расчетов в широком диапазоне параметров с последующей экспериментальной проверкой является единственной возможностью добиться максимально допустимого коэффициента поджатия и, следовательно, максимальной эффективности СД.

### Теплообменник

Использование теплообменника в СВД для DF-НХЛ приводит, с одной стороны, к снижению температуры пассивного газа и в результате к увеличению коэффициента эжекции; с другой стороны, увеличиваются потери давления на местных сопротивлениях (трубках), что ведет к снижению  $n$ . Таким образом, увеличение коэффициента эжекции возможно только в том случае, когда эффект от снижения температуры будет превышать снижение  $n$  из-за потерь полного давления в теплообменнике. В расчетах определялись температура на выходе и потери давления при различных вариантах геометрии (варьировалась степень оребрения, количество рядов, материал труб и т. п.). Модели расчетных областей (потока и трубок) были созданы в пакете SolidWorks и импортированы в расчетный пакет CFX через формат IGES. Решалась сопряженная задача конвективного теплообмена газа со стенками трубок и теплопроводности через стенки. В качестве граничных условий на входе задавался массовый расход и полная температура потока 1200 К, на выходе — давление внешней среды 50 Торр (давление, обеспечиваемое эжектором), на внутренних стенках трубок — средняя температура охладителя (вода) 310 К и коэффициент теплоотдачи  $5400 \text{ Вт/м}^2\text{К}$ .

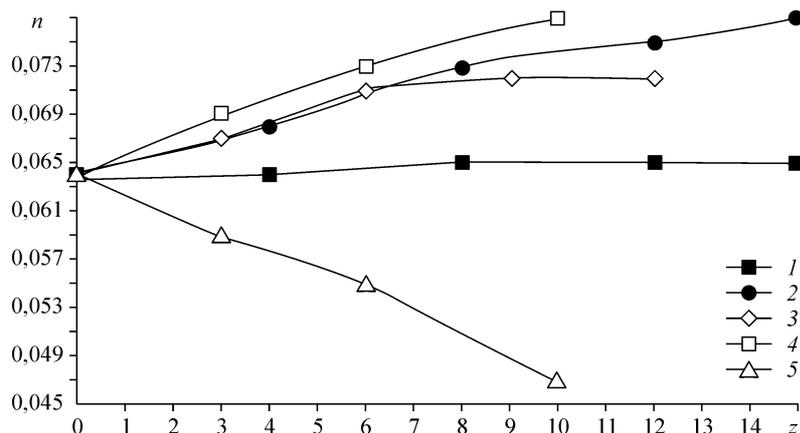


Рис. 4. Зависимость коэффициента эжекции от параметров теплообменника.

$d = 14$  (1, 2), 17 (3), 18 (4, 5),  $S_1 = 47$  (1, 2), 55 (3), 60 (4), 39 (5),  $S_2 = 40$  (1, 2), 50 (3, 4), 39 (5),  $D_p = 38$  (1, 2), 48 (3, 4, 5),  $S_p = 8$ , Ст. (1), 8, Al (2), 7,5, Al (3), 10, Al (4), 10, Ст. (5).

На рис. 4 показано влияние количества рядов в теплообменнике ( $z$ ) по потоку при коридорном расположении труб на коэффициент эжекции для различных вариантов геометрии теплообменника ( $d$  — внешний диаметр трубы,  $S_1$  — расстояние между осями труб по ширине пучка,  $S_2$  — расстояние между осями труб по потоку,  $S_p$  — расстояние между ребрами,  $D_p$  — диаметр ребра, все в мм) и материалов ребер (алюминий, Al и нержавеющая сталь, Ст.). Видно, что одни варианты геометрии теплообменника повышают коэффициент эжекции, другие — его уменьшают. В частности, при уменьшении шага оребрения отмечены пороговые значения, начиная с которых увеличение потерь давления превалирует над эффектом снижения температуры, и характеристики теплообменника резко ухудшаются. В результате проведенных многопараметрических расчетных исследований определена оптимальная конструкция ТО для заданных параметров потока за сверхзвуковым диффузором, однако окончательные выводы о степени эффективности работы теплообменника в составе СВД могут быть сделаны только на основе экспериментальной проверки.

### Эжектор

В качестве расчетной области использовался сектор осесимметричного эжектора с углом  $10^\circ$ . При построении сетки с помощью сеточного генератора CFX применялось сгущение сетки у стенок сопла и внешних стенок эжектора. Кроме того, для более точного расчета пограничных слоев вдоль всех стенок применялось поперечное сгущение ячеек, представляющих собой вытянутые в продольном направлении призмы. Молярная масса активного газа (продукты сгорания этилового спирта в воздухе и пары воды) принималась равной 24,7 г/моль, пассивного — 6,4 г/моль, полная температура активного газа 1300 К, пассивного — 600 К, вытекание газа из эжектора происходит в атмосферу ( $T_0 = 300$  К,  $P_0 = 10^5$  Па). На стенках сопла и внешних стенках эжектора принимались адиабатические условия с прилипанием. Решалась нестационарная задача с шагом по времени  $10^{-4}$  с.

Как известно [3], в каналах с поджатием наблюдается явление гистерезиса — давление запуска канала превышает давления срыва. Давление запуска эжектора определялось при постепенном повышении расхода активного газа и, соответственно, давления в форкамере сопла до момента полного запуска канала (при этом

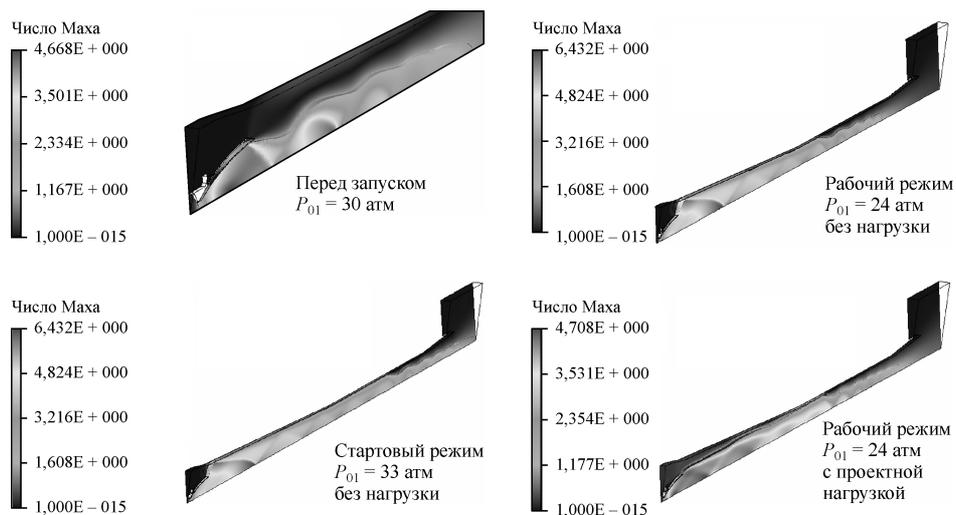


Рис. 5. Картины течения в эжекторе.

расход пассивного газа отсутствовал). Соответственно, давление срыва определялось при понижении давления из запущенного состояния до момента срыва эжектора (разрушения сверхзвукового режима течения). Картины течения в эжекторе перед запуском, на стартовом режиме, рабочем режиме газогенератора без нагрузки и на рабочем режиме эжектора с проектной нагрузкой представлены на рис. 5. На рисунке показаны распределения чисел Маха и звуковая поверхность. Картина течения в целом соответствует известным шлирен-фотографиям [8] развития процессов в эжекторе при увеличении расхода эжектирующего газа. Хорошо видна периодическая ударно-волновая структура центральной высоконапорной струи, переход к дозвуковому течению в конце камеры перед запуском. Запуск эжектора характеризуется присоединением звуковой поверхности к его стенке, скачкообразным падением давления на входе в эжектор до уровня 7 Тор. Согласно расчетам это происходит при давлении в форкамере активного газа 3,3 МПа. Обратный процесс наступает при снижении давления до уровня 2,4 МПа. Это давление принято в качестве рабочего. Нагрузочная характеристика эжектора определялась на предсрывном режиме в нескольких точках по расходу пассивного газа. На основании результатов расчетов определяются уточненные газодинамические характеристики и геометрические размеры эжектора, необходимые для проектирования.

### 3. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ УСТАНОВОК

Для проведения экспериментальных исследований и верификации численного моделирования были созданы два стенда, один — лабораторный, предназначенный для отработки эжектора, парогазогенератора, системы управления и сбора данных (СУСД) и системы подачи компонентов. Его технические характеристики представлены в таблице. Второй стенд позволял проводить натурные испытания полномасштабной СВД для HF/DF-лазера, включающей в себя генератор модельного газа (ГМГ) с переходной камерой, диффузор, активный водяной теплообменник и эжектор с парогазогенератором (ПГГ) в качестве источника активного газа. Переходный объем с ГМГ устанавливался при отработке элементов СВД вместо лазерной камеры. На выходе из переходного объема помещено сопло, обеспечивающее число Маха потока на входе в СД, соответствующее лазерному газу. Системы управления и подачи компонентов натурального и лабораторного стендов были

Таблица

Технические характеристики стенда

Диаметр критического сечения сопла эжектора, мм	$d_*$	41,2	37
Диаметр выходного сечения сопла эжектора, мм	$d_{\text{вых}}$	197	197
Число Маха на выходе	$M$	4,49	4,71
Активный поток		Парогаз	
Массовый расход активного газа, кг/с	$G_1$	до 9	
Давление торможения активного потока, атм	$P_{01}$	23	28
Температура торможения активного потока, К	$T_{01}$	1300	
Температура торможения модельного газа на входе в эжектор, К	$T_{02}$	1300–1400	1300 – 1400
Молярная масса модельного газа, г/моль	$\mu_2$	9	
Массовый расход пассивного газа, кг/с	$G_2$	Холодный воздух — до 1,5 Модельный газ — до 0,5	
Входной диаметр камеры смешения, мм	$d_{12}$	351	351
Диаметр горла эжектора, мм	$d_3$	212	212
Общая длина эжектора, мм		4435	4435

аналогичны. В качестве активного (эжектирующего) газа во всех экспериментах использовался парогаз — смесь продуктов сгорания этилового спирта и воздуха с водой с температурой до 1300 К. В качестве пассивного (эжектируемого) газа при работе на стендах использовались холодный воздух и газ с молярной массой и показателем адиабаты, соответствующими параметрам продуктов сгорания непрерывного химического HF/DF–лазера, который создавался с помощью ГМГ. В генераторе модельного газа, подробное описание которого дано в [11], в качестве горючего и окислителя использовались метан и кислород, а в качестве разбавителя — гелий и азот. Окончательная верификация и проверка работоспособности СВД производилась в процессе испытаний совместно с HF/DF–лазером.

Общий вид лабораторного стенда представлен на рис. 6. В состав стенда входили следующие системы: эжектор центральной схемы подачи активного газа 1 с контрольным объемом 3, к которому присоединен генератор модельного газа 2, система питания эжектора активным газом (парогазогенератор с системой хранения и подачи компонентов) 4.

Эжектор проектировался с учетом рекомендаций [2, 3] по выбору рабочих тел и результатов проведенных расчетов. Конструкция эжектора предусматривает возможность регулирования числа Маха на срезе сопла активного газа путем дискретного изменения размера критического сечения сопла с помощью сменных вставок. Поскольку активный газ имеет высокую температуру (до 1300 К), а эжектор

является неохлаждаемым, сопловой аппарат изготовлен из специальных жаропрочных сплавов, которые позволяют обеспечить прочность конструкции при рабочей температуре и давлении. Подача пассивного газа в контрольный объем осуществляется через переходник, который обеспечивает равномерность потока на входе в эжектор.

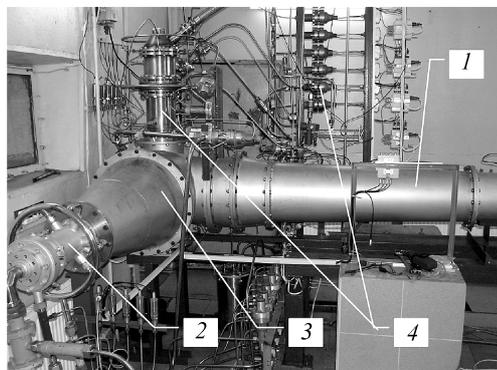


Рис. 6. Общий вид лабораторного стенда.

Парогазогенераторы, использующиеся на стендах, работали на компонентах воздух–спирт–вода и по конструкции аналогичны ПГГ, описанным в [2]. Главной особенностью работы ПГГ в составе стенда являлось обеспечение двух режимов работы эжектора в течение старта. В начале обеспечивались условия запуска ЭЖ с повышенным расходом активного газа, затем, примерно через 1-2 секунды расход снижался до получения в форкамере эжектора давления, соответствующего номинальному (предсрывному) режиму. Работа системы на этом режиме продолжалась 10-12 секунд. Разница между запусковым и рабочим давлением в форкамере может достигать 1–1,5 МПа (40–60 %), что в результате приводит к значительному повышению коэффициента эжекции.

Технически двухступенчатый режим работы парогазогенератора реализуется за счет подачи каждого из жидких и газообразных компонентов в ПГГ на стартовом режиме по двум параллельным линиям. После запуска эжектора по команде СУСД одна из двух магистралей каждого компонента закрывается, расходы компонентов пропорционально снижаются и формируется рабочий режим работы ЭЖ. Осциллограмма работы парогазогенератора по давлению представлена на рис. 7. Хорошо видны два плато давления: первое — 3,5 МПа, давление запуска на стартовом режиме, второе — 2,5 МПа, давление на рабочем режиме, немного превышающее давление срыва ЭЖ.

Система управления и сбора данных представляла собой совокупность специализированных аппаратных, программных и измерительных средств, предназначенных для автоматического управления системами стенда, а также для измерения всех параметров, сбора и обработки данных.

СУСД обеспечивала управление исполнительными устройствами по 40 каналам и опрос датчиков по 50 каналам с частотой опроса не менее 60 Гц. Измерения давлений во всех элементах СВД проводились с помощью набора датчиков давления МИДА, имеющих точность 0,5 %, температура газа измерялась с помощью термопар.

В ходе исследования определялись характеристики эжектора: давление запуска и срыва, нагрузочные характеристики в широком диапазоне расходов пассивного газа. Измерялось распределение статического давления вдоль стенки эжектора.

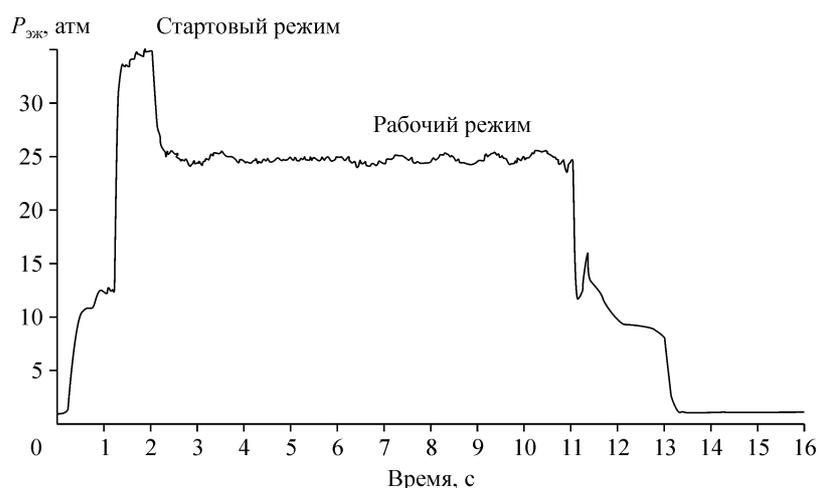


Рис. 7. Давление перед соплом эжектора при двухрежимной работе.

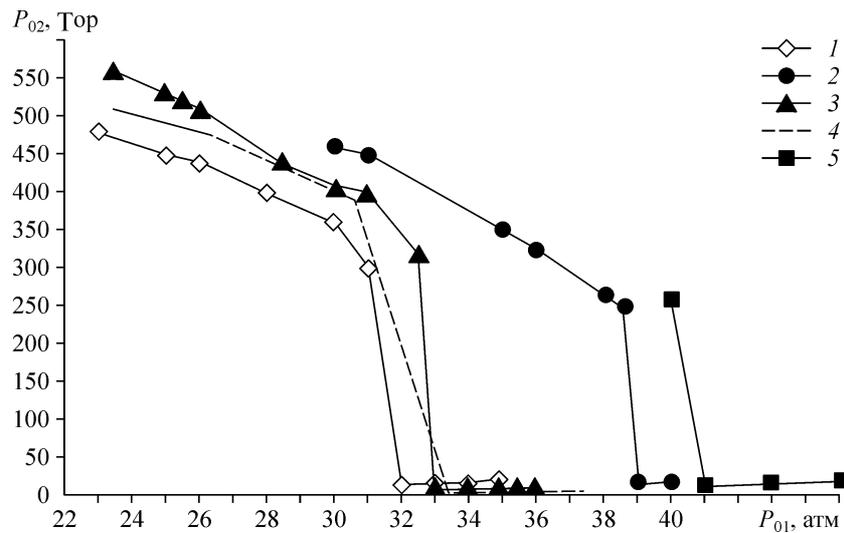


Рис. 8. Запуск эжекторов при различных значениях числа Маха сопла.

Варианты: 1 — эксперимент,  $M = 4,49$  (1), 2 — эксперимент,  $M = 4,71$  (2), 3 — эксперимент,  $M = 4,55$  (3), 3 — 3D-расчет,  $M = 4,55$  (4), 4 — эксперимент,  $M = 4,76$  (5).

#### 4. ВЕРИФИКАЦИЯ ПРЕДЛОЖЕННОЙ МОДЕЛИ

##### Запуск эжектора

На рис. 8 показаны запускные кривые для четырех вариантов эжекторов (см. табл.). Они представляют собой зависимости давления разрежения в контрольном объеме перед эжектором от давления активного газа в форкамере сопла при отсутствии расхода пассивного газа. При повышении давления в форкамере происходит плавное падение давления перед эжектором, что говорит о докритическом режиме работы эжектора. Дальнейшее увеличение  $P_{01}$  приводит к формированию в определенном поперечном сечении камеры смешения (сечении “запирания” [8]) сверхзвукового течения, что сопровождается резким падением  $P_{02}$ . С увеличением числа Маха сопла кривые запуска сдвигаются в область больших значений давления.

На рис. 8 представлены также запускные кривые для варианта 3, полученные по результатам трехмерных расчетов. Результаты расчета качественно и количественно совпадают с экспериментальными данными.

##### Локальные параметры

Для оценки адекватности расчетной модели построены распределения давления на стенке газодинамического тракта эжектора при различных режимах. На рис. 9 представлены данные для запускного и рабочего давлений ПГТ и работы эжектора при нулевой нагрузке, полученные в результате трехмерных расчетов и экспериментов, а также расчетные картины течения (распределение чисел Маха). Масштаб канала эжектора соответствует масштабу оси  $x$ , на которой представлена продольная координата в миллиметрах. Расчетные распределения давления вдоль камеры смешения и диффузора до начала псевдоскачка хорошо совпадают с экспериментальными данными. Небольшое отличие наблюдается в положении скачка давления, соответствующего переходу к дозвуковому течению у стенки эжектора. В целом, следует отметить хорошее совпадение расчетных и экспериментальных данных, причем даже в деталях (пики в распределениях давления на стенке соответствуют периодичности ударно-волновой структуры течения, которая видна

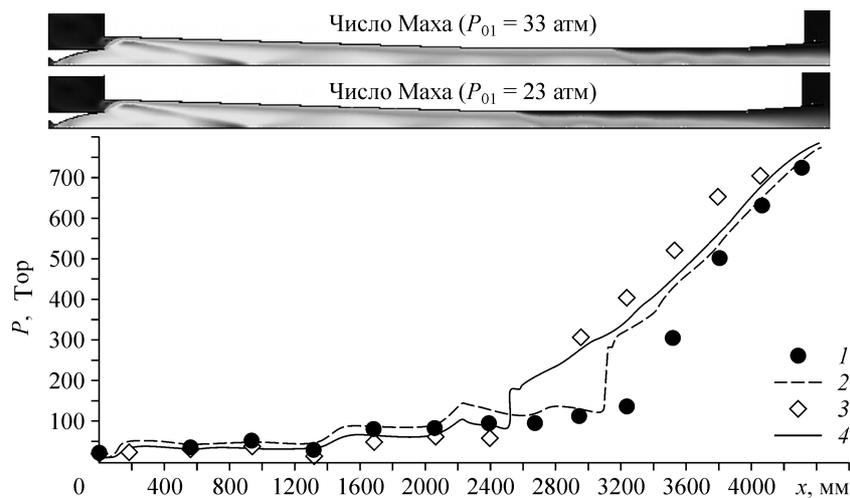


Рис. 9. Распределение статического давления вдоль эжектора на стартовом и рабочем режимах.

$P_{01} = 33$  атм., эксперимент (1), 3D-расчет (2);  $P_{01} = 23$  атм., эксперимент (3), 3D-расчет (4).

на распределениях чисел Маха), что подтверждает адекватность использованной модели расчетов течения в эжекторе.

### Срыв работы эжектора

Работа СВД совместно с HF/DF-лазером диктует определенные требования не только к запуску, но и к процессу схода с режима эжектора. Давление в его газодинамическом тракте на рабочем режиме значительно ниже атмосферного ( $P_{02} = 55$  Торр), при прекращении подачи активного газа (выключении эжектора) возникает обратное течение парогазовой смеси из канала ЭЖ в камеру перед ним. Т. е. при срыве эжектора продукты сгорания и водяной пар от водяной завесы системы шумоглушения попадут в переходную камеру СВД, диффузор и лазерную камеру (см. рис. 1), что может привести к загрязнению зеркал резонатора и соплового блока.

Для предотвращения процесса обратного всасывания предусмотрен газодинамический срыв работы эжектора, который обеспечивается в натурной установке подачей большого расхода азота (в лабораторной установке — воздуха) через специальный коллектор в переходную камеру перед окончанием работы газогенератора. На рис. 10 показаны поле течения и распределения давления, полученные

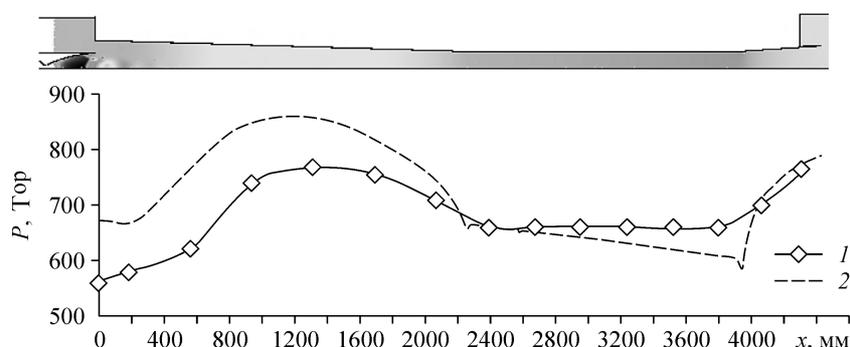


Рис. 10. Распределение давления в эжекторе после срыва сверхзвукового течения. Эксперимент (1), 3D-расчет (2).

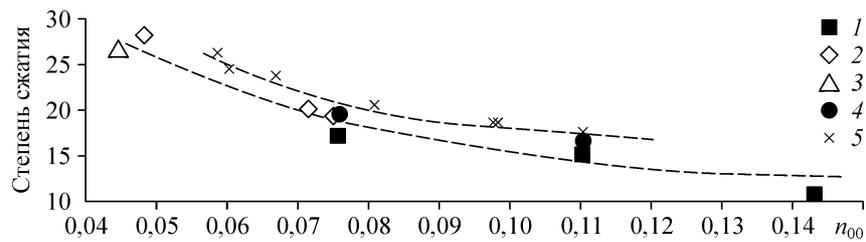


Рис. 11. Нагрузочная характеристика эжектора.

Число Маха активного потока: 4,55 — СВД+воздух (1), СВД+DF+лазер (2), СВД+Гелий (3); 4,76 — СВД+воздух (4), СВД+стимулятор (5).

при трехмерных расчетах и в экспериментах, где в качестве пассивного газа использовался воздух. При импульсной подаче расхода, превышающего предельную нагрузку для данного эжектора в 2,1 раза, сверхзвуковое течение в эжекторе срывается, поток становится дозвуковым, в камере смешения эжектора в начальный момент возникает “пробка” газа, давление в которой превышает атмосферное. Выключение парогазогенератора в этот момент не приводит к возвратному течению парагаза в переходную камеру. Лазерная камера, диффузор и переходная камера в период окончания работы лазера заполняются азотом и становятся изолированными от воздействия парагаза и внешней атмосферы.

#### Нагрузочные характеристики

На рис. 11 представлены нагрузочные характеристики эжектора с фиксированными геометрическими размерами, полученные в экспериментах с холодным воздухом и гелием, модельным и лазерным газом в качестве пассивного потока. Обобщение данных проводилось с помощью приведенного коэффициента эжекции  $n_{00}$ , который учитывает различия в температурах и молярных массах активного и пассивного потоков. Следует отметить хорошее совпадение расчетных и экспериментальных данных для каждого вида эжектируемого газа, что подтверждает возможность использования  $n_{00}$  при обобщении данных, полученных для различных газов.

Увеличение числа Маха сопла ЭЖ обеспечивает большее разрежение (на 3–5 тор в рассматриваемом случае) при фиксированном  $G_2$  или больший коэффициент эжекции при заданной степени сжатия  $\varepsilon$ .

#### 5. СОГЛАСОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ СВЕРХЗВУКОВОГО ДИФфуЗОРА, ЭЖЕКТОРА И ТЕПЛООБМЕННИКА И РАБОТА СИСТЕМЫ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ КАК ЕДИНОГО КОМПЛЕКСА

Завершающим этапом исследования, после отработки всех составляющих систем, являлись комплексные испытания СВД совместно с HF/DF-НХЛ. На характер запуска многосоплового блока в лазерном канале сложной формы влияет большое количество факторов: установление течения в каналах прямоугольной формы, наличие уступов при сопряжении блока с каналом: донные области у самого блока, а также резонаторные полости, которые особенно сильно влияют на характер течения, поскольку определяют течение в крайних каналах диффузора. Если в гладком канале расчетное течение устанавливается практически сразу при достижении определенного давления в форкамере и момент запуска регистрируют по резкому падению статического давления, то запуск сложного канала проходит через некоторые стадии [6, 7]. В этом случае необходимо рассматривать процесс установления течения вдоль всего канала во времени, включая нестационарные явления.

Первоначальное падение давления еще не означает окончательного запуска — уровень давления в резонаторной полости в этот момент, как правило, не достигает расчетной величины и можно сказать, что канал недозапустился. При этом отличие давления в полости от расчетной величины может быть незначительным, но поскольку лазер — это резонансная система, такое отличие оказывает заметное негативное влияние на рабочие процессы в нем и приводит, в частности, к снижению мощности излучения. Состояние недопуска является устойчивым, и требуется дальнейшее увеличение или давления в форкамере соплового блока или производительности эжектора, либо изменение циклограммы выхода на режим всей системы. Достичь расчетного давления в резонаторной полости при небольшом недопуске можно также за счет создания некоторого импульсного возмущения на входе в диффузор с помощью малоразмерных сопел. В диффузоре натурального стенда на боковых стенках крайних каналов, аналогично [2, 7], были установлены щелевые сопла, через которые в момент запуска подавался азот.

Лазерная камера проектировалась совместно со сверхзвуковым диффузором. Были заданы расчетные параметры потока на выходе из лазерной камеры и характеристики СД оценивались на их основе. Горизонтальные стенки лазерной камеры сделаны профилированными с нулевым углом схода в месте стыковки с СД. Пилоны толщиной 28 мм, разделяющие канал диффузора, вдвинуты в лазерную камеру и начинались на расстоянии 175 мм от входного фланца СД. Для облегчения запуска диффузора в конструкции лазерной камеры использовались заслонки, закрывающие полости оптического резонатора в момент старта.

Запуск комплекса СВД-НХЛ производился в следующей последовательности: стартовый режим ПГГ и ЭЖ, переход на номинальный режим с пониженным расходом (давление в лазерном канале снижается до 3–5 Тор), запуск лазера. Параметры эжектора и сверхзвукового диффузора согласованы таким образом, чтобы запускная характеристика СД пересекала предсрывную ЭЖ [3]. Происходит устойчивая работа всей системы и реализуется эффективный режим работы СВД (необходимая степень сжатия потока обеспечивается минимально допустимым расходом эжектирующего газа).

В ходе испытаний СВД с лазером были зарегистрированы два режима работы лазера. На первом режиме лазер работал в соответствии с проектными условиями, и мощность его излучения составляла несколько десятков кВт.

На втором режиме генератор атомарного фтора работал в расчетном режиме и осуществлялась подача вторичного горючего в сопловой блок, однако генерация излучения отсутствовала. По-видимому, из-за неоптимального соотношения компонентов топлива реакция горения либо отсутствовала, либо проходила частично (происходила не полная выработка окислительного газа). Соответственно, уровень тепловыделения в лазерной камере был ниже расчетного, и параметры потока на входе в СД не соответствовали проектным — фиксировалось большое число Маха, большое полное давление, низкое статическое давление и температура торможения, нерасчетный состав лазерного газа. Не являясь штатным, этот режим, тем не менее, представляет интерес для анализа работы СВД.

На рис. 12 представлены результаты экспериментов при работе СВД совместно с генератором модельного газа и с лазером, показаны распределения давления вдоль канала диффузора при работе ГМГ (генератор модельного газа) на двух режимах работы лазера — с горением вторичного горючего и без него. Вертикальными пунктирными линиями отмечены характерные участки тракта: лазерная камера, сверхзвуковая часть, дозвуковая часть СД и теплообменник. По оси абсцисс отложены абсолютные размеры канала, начало соответствует срезу соплового блока. В этих экспериментах параметры модельного и лазерного газов были практически одинаковы. Отличие этих двух вариантов заключается в способе получе-



Рис. 12. Распределения давления вдоль канала диффузора.  
Лазер, режимы: 1 (1), 2 (2); ГМГ (3).

ния параметров на входе в СД. Если в случае с лазером в лазерной камере происходит торможение сверхзвукового потока за счет реакции тепловыделения, то при работе с ГМГ моделирование тепловыделения невозможно и лазерная камера работает как сопло, где происходит разгон потока до числа  $M = 1,9$ .

При сравнении результатов видно, что способ получения расчетных параметров потока на входе в СД не влияет на процесс торможения в диффузоре (картина торможения в обоих случаях практически одинакова). Отсюда следует, что результаты испытания СВД DF-НХЛ с помощью ГМГ и лазера соответствуют друг другу. Таким образом, полученные данные подтверждают выводы работы [11] о правомерности использования ГМГ при испытаниях СВД.

Представленные на рис. 12 данные показывают, что в проведенных экспериментах сверхзвуковой диффузор был запущен. В лазерной камере реализовывался сверхзвуковой режим течения, а в канале СД происходило восстановление давления в процессе торможения потока. На режиме 1 параметры потока в лазерной камере и на входе в диффузор соответствовали расчетным.

Числа Маха рассчитывались по данным измерений полного давления в потоке трубкой Пито и статического давления на стенке. На режиме без горения  $M \approx 2,5$  и  $P_0 \approx 140$  Тор, на режиме с горением  $M \approx 1,7$  и  $P_0 \approx 80$  Тор (при этом уровень давления за прямым скачком  $P'_0$  примерно одинаковый для обоих режимов  $\approx 70$  Тор).

Несмотря на то, что режимы 1 и 2 существенно отличаются друг от друга по параметрам на входе в СД, характер поведения давления на стенке у них схожий и соответствует классическому распределению давления вдоль псевдоскачка. В обоих случаях зона торможения начинается на достаточно большом расстоянии от начала диффузора, т. е. уровень противодавления, обеспечиваемый эжектором, ниже, чем давление восстановления, и полученные режимы не являются предсрывными.

Различие в уровне противодавления для режимов 1 и 2 (42 и 35,5 Тор соответственно) несмотря на одинаковые расходы лазерного газа объясняется следующим. На режиме 1, когда реакция горения завершается полностью, температура потока на входе в эжектор выше, чем на режиме 2, а согласно [2, 11], с ростом

температуры пассивного потока при прочих равных условиях (в первую очередь при постоянстве коэффициента эжекции) давление пассивного газа на входе в ЭЖ увеличивается. Небольшое (на 1,5–2 Тор) понижение давления вдоль теплообменника связано с влиянием гидравлических потерь.

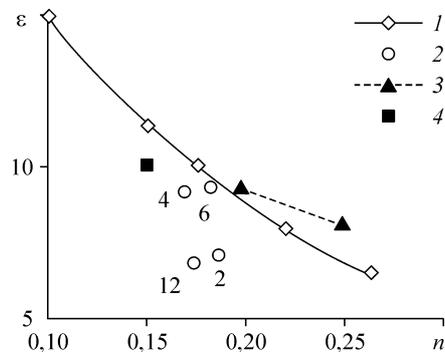
О незавершенности процессов горения в лазерной камере на режиме 2 можно также судить по поведению давления в лазерной камере. Рост статического давления, который начинается сразу за сопловым блоком, связан с процессом тепловыделения в сверхзвуковом потоке. Несмотря на то, что лазерная камера является расширяющейся, что частично компенсирует тепловыделение, поток тормозится. Можно предположить, что зона подъема давления соответствует зоне горения (тепловыделения), а уровень давления характеризует интенсивность торможения. В этом случае из сравнения чисел Маха и полного давления на входе в СД видно, что интенсивность торможения на режиме 1 больше, чем на режиме 2.

Давление восстановления  $P_{\max} = k P'_0$  в выхлопном диффузоре HF/DF — НХЛ близко к давлению за прямым скачком  $P'_0 = \sigma(\lambda)P_0$ , где  $\sigma$  — газодинамическая функция, определяющая потери давления торможения после прямого скачка,  $k$  — эмпирический коэффициент, учитывающий потери на трение. Для модельных установок с гладким каналом [12]  $P_{\max}$  может достигать  $\approx 0,9$  от  $P'_0$ , для крупномасштабных установок эта величина несколько меньше:  $\approx (0,7-0,8) P'_0$ . Режим работы СВД, показанный на рис. 12, не является предсрывным (давление  $P_{\max}$ , соответствующее по расчетам предсрывному режиму, не достигается). Эжектор СВД работал с запасом, давление в переходной камере перед ним понижалось до 45 Тор, характеристики СД и ЭЖ пересекались [3], что обеспечивало более надежный запуск.

Полученные данные свидетельствуют о том, что проектирование сверхзвуковых диффузоров для DF-НХЛ можно проводить на основе известных параметров на входе в СД, поскольку процесс тепловыделения происходит на коротком участке в лазерной камере и к началу диффузора завершается (см. рис. 12). Таким образом, в данном случае тепловыделение не влияет на процесс торможения в СД, который происходит согласно классическим представлениям о прохождении газа через псевдоскачок. Приведенные результаты подтверждают работоспособность предложенной расчетной методики при определении параметров СВД.

Параметры составляющих элементов установки в экспериментах согласованы таким образом, чтобы обеспечивалась работа на пересечении срывной характеристики ЭЖ и запускной СД, что позволяет сочетать эффективность СВД с высокой надежностью запуска лазерного канала. Чтобы добиться максимальной эффективности работы комплекса, требуется работать на пересечении срывных характеристик СД и ЭЖ, что, как известно из [3], обеспечивает максимальный коэффициент эжекции. Но для этого требуется детально изучить процесс установления течения во времени вдоль сложного канала установки в целом, включая лазерную камеру с многосопловым блоком и полостями резонаторов, диффузор, переходную емкость с теплообменником и эжектор,

Рис. 13. Нагрузочные характеристики эжектора с интенсификаторами смешения. Щелевой насадок (1), шевроны (2), табы (3), без вихреобразователей (4).



а также иметь возможность тонкой регулировки процесса запуска сложного канала.

Дальнейшее повышение эффективности работы СВД возможно, в первую очередь, за счет улучшения параметров эжектора. Поскольку в основе работы эжектора лежит взаимодействие газодинамических потоков, то решение этой задачи связано с интенсификацией и оптимизацией процесса смешения на их границах. Предложенные в [13] варианты так называемых дифференциальных эжекторов со щелевыми насадками позволяют получать высокие  $\varepsilon$ , но при очень маленьких коэффициентах эжекции. Это обстоятельство не дает возможности использовать такие устройства в СВД.

В настоящее время для интенсификации процесса смешения исследуется возможность использования устройств формирования вихрей в виде треугольных или квадратных выступов на кромке сопла ЭЖ (в литературе их называют шевронами и табами). Исследования проводятся на одноступенчатых критических воздушных эжекторах с центральным соплом, имеющим диаметр 20 мм и число Маха  $M = 4,5$ , количество шевронов изменялось от 2 до 12.

Сравнение эффективности ЭЖ с интенсификаторами смешения и без них показано на рис. 13. Для обычного сопла  $k\varepsilon = 1,5-1,6$  [14], щелевой насадок и эжектор с шевронами обеспечивают  $k\varepsilon = 1,7-1,8$  (цифрами на графике указано количество шевронов, лучший результат получен для шести шевронов), для эжектора с табами значение  $k\varepsilon$  увеличивается до 2,1.

Следует подчеркнуть, что результаты исследования влияния интенсификаторов смешения получены на установке небольших размеров, причем отмечено, что их применение затрудняет запуск эжектора. Поэтому эффективность применения вихреобразующих устройств в крупномасштабных установках требует экспериментального подтверждения.

Таким образом, в работе предложена и апробирована верифицированная методика проектирования СВД для HF/DF-НХЛ с заданными параметрами. Указаны пути дальнейшего улучшения характеристик СВД, что является решающим условием для улучшения массогабаритных характеристик автономных лазерных комплексов. Оптимизация СВД позволит реализовать лазерные комплексы в мобильном варианте.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Химические лазеры / Под ред. Р. Гросса и Дж. Ботта. — М.: Мир, 1980.
2. Борейшо А.Л., Киселев И.А., Орлов А.Е. и др. Системы восстановления давления мощных газовых и химических лазеров // Теплофизика и аэромеханика. — 2001. — Т. 8, № 4. — С. 605–623.
3. Мальков В.М., Борейшо А.С., Савин А.В. и др. О выборе рабочих параметров системы восстановления давления для сверхзвуковых химических лазеров // Там же. — С. 625–637.
4. Neumann E.P., Lustwerk F. Supersonic Diffuser for Wind Tunnels // J. Appl. Mech. — 1949. — Vol. 16, No. 2. — P. 195–202.
5. Кталхерман М.Г., Мальков В.М., Рубан Н.А. Торможение сверхзвукового потока в канале постоянного сечения // ЖПМТФ. — 1984, № 6. — С. 48–57.
6. Кталхерман М.Г., Мальков В.М., Рубан Н.А. Влияние определяющих параметров на эффективность работы сверхзвуковых диффузоров прямоугольного сечения // Газодинамика проточной части ГДЛ: Сб. научн. тр. СОАН СССР, ИТПМ – Новосибирск, 1987. — С.116–162.
7. Boreysho A. S., Malkov V.M. Start feature of the Supersonic Chemical Laser (SCL) channel, operating with Pressure Recovery System (PRS) // Proc. of XVI Int. Symp. on Gas Flow, Chemical Laser and High-Power Lasers, Gmunden, Austria, September 4-8, 2006. — Vol. 6346, pt. 2.–К-1.
8. Абрамович Г.Н. Прикладная газовая динамика. — М.: Наука, 1976. — 888 с.
9. Васильев Ю.Н. Газовые эжекторы со сверхзвуковыми соплами // Сб. работ по исследованию сверхзвуковых газовых эжекторов. — М.: Изд. ЦАГИ, БНИ, 1961. — С. 134–212.
10. Искра А.Л. Эжектор с разными эжектирующим и эжектируемым газами // Сб. работ по исследованию сверхзвуковых газовых эжекторов. — М.: Изд. ЦАГИ, БНИ, 1961. — С. 303–321.

11. **Борейшо А.С., Леонов А.Ф., Киселев И.А. и др.** // Методика испытания систем восстановления давления для HF/DF-НХЛ // Теплофизика и аэромеханика. — 2001. — Т. 8, № 4. — С. 647–656.
12. **Driscoll R.J., Moon L.F.** Pressure recovery in chemical lasers // AIAA J. — 1977. — Vol. 15, No. 5. — P. 665–673.
13. **Аркадов Ю.К.** Новые газовые эжекторы и эжекционные процессы. — М.: Изд-во физ.-мат. литературы, 2001. — 336 с.
14. **Соболев А.В., Запрягаев В.И., Мальков В.М.** Одноступенчатый эжектор большой степени сжатия // Теплофизика и аэромеханика. — 2005. — Т. 12, № 1. — С. 149–158.

*Статья поступила в редакцию 24 октября 2006 г.*