

# Газодинамика активной среды сверхзвукового непрерывного химического HF-лазера

И.А.Федоров, М.А.Ротинян, А.М.Кривицкий

*Экспериментально исследованы газодинамические характеристики пятикиловаттного сверхзвукового непрерывного химического HF-лазера с сопловым блоком размером  $25 \times 2.8$  см, выполненным по схеме смешения сопло–сопло. Измерены распределения чисел Маха, статического давления, полного давления за прямым скачком уплотнения и потерь полного давления в потоке активной среды в широких диапазонах изменения расхода вторичного горючего (водорода) и давления в генераторе атомарного фтора. Выявлена взаимосвязь энергетики лазера с газодинамикой и оптическим качеством его активной среды.*

**Ключевые слова:** химический лазер, газодинамические и энергетические характеристики.

## Введение

Активная среда (АС) сверхзвукового непрерывного химического HF-лазера (HF-НХЛ) представляет собой сверхзвуковой поток, образованный первоначально разделенными между собой мелкомасштабными струями окислительного газа (атомов фтора) и вторичного горючего (водорода), истекающими из соплового блока (СБ). Газодинамические явления, протекающие в этом потоке, являются своеобразным «фоном», на котором развиваются процессы смешения реагентов химической накачки, генерации лазерного излучения и релаксации рабочих молекул. В связи с этим совершенно естествен интерес к характеристикам этого «фона», влияющего на выходные параметры лазера. К газодинамическим характеристикам сверхзвукового газового потока принято относить полное давление в набегающем потоке  $p_{01}$ , статическое давление в потоке  $p_s$ , число Маха набегающего потока  $M$  и потери полного давления потока.

Какую информацию об АС можно почерпнуть из газодинамических измерений? Во-первых, газодинамические характеристики потока на выходе из СБ влияют на смешение струй окислительного газа и вторичного горючего в полости оптического резонатора (ОР) и, следовательно, на энергетику лазера. Во-вторых, неоднородности давления (плотности) в АС сильно отражаются на ее оптическом качестве. В-третьих, газодинамические характеристики среды, покидающей полость ОР, весьма важны для функционирования системы восстановления давления при эвакуации отработанных продуктов реакции в окружающее пространство. И наконец, экспериментальное нахождение распределения давления может рассматриваться в качестве одного из объективных критериев для оценки адекватности математических моделей, используемых для анализа работы HF-НХЛ.

Очевидно, что газодинамика АС определяется способом формирования газовых потоков, который задается конструкцией СБ. В работе [1] выполнено детальное экспериментальное исследование газодинамических характеристик HF-НХЛ с СБ радиального расширения, который соответствует схеме смешения реагентов сопло–инжектор. Основная цель исследований, результаты которых обсуждаются в настоящей статье, состояла в изучении влияния на газодинамику потока АС режимных параметров HF-НХЛ с СБ, отвечающим схеме смешения реагентов сопло–сопло, а также в анализе ее взаимосвязи с оптическим качеством АС, восстановлением давления газового потока и энергетикой лазера.

## 1. Экспериментальная установка и методики измерений

В качестве объекта исследования использовался сверхзвуковой HF-НХЛ автономного типа, рассчитанный на генерацию излучения мощностью  $\sim 5$  кВт. Лазер оснащен СБ с размером выходного сечения  $25 \times 2.8$  см. Сопла для подачи вторичного горючего ( $H_2$ ) и окислительного газа (F) размещены с шагом 7.5 мм. В качестве рабочей среды применялись традиционные реагенты – газообразные дейтерий, фтор, гелий и водород в молярном отношении  $D_2:F_2:He:H_2 = 1:\alpha:\psi(\alpha-1):\alpha_2(\alpha-1)$ . Лазер находится в барокамере (камере низкого давления), предназначенной для отделения от внешней среды газового потока, истекающего из СБ в режиме свободной струи.

В ходе исследования изучалось влияние на газодинамические, оптические и энергетические характеристики АС коэффициента избытка вторичного горючего  $\alpha_2$ , определяющего количество водорода, и давления в генераторе атомарного фтора (ГАФ)  $p_c$ . В экспериментах измерялись газодинамические характеристики АС, ее протяженность и оптическое качество, мощность лазерного излучения, а также проводилась киносъемка потока. Полное давление за прямым скачком уплотнения и статическое давление измерялись пневмометрическим методом с помощью неохлаждаемых зондов (отборников

давления), которые непрерывно перемещались в направлении оси ОР со скоростью 2 мм/с.

Методики газодинамических измерений и обработки результатов подробно изложены в [2]. По данным этих измерений для расчетного показателя адиабаты с помощью формулы Рэля [3] определялись числа Маха в набегающем потоке АС. Протяженность АС в направлении течения потока оценивалась по методике двойного щелевого резонатора [4], а ее оптическое качество контролировалось с помощью сдвигового интерферометра [5] при зондировании излучением гелий-неонового лазера.

Для измерения мощности лазерного излучения применялся устойчивый двухзеркальный ОР закрытого типа, образованный неохлаждаемыми сферическими зеркалами-калориметрами диаметром 9 см с радиусом кривизны 5 м, изготовленными из полированной меди. Методика измерений подробно описана в [2]. Киносъемка потока АС осуществлялась в направлении, перпендикулярном оси ОР, кинокамерой типа 1КСР-1М с частотой 10 кадр./с.

## 2. Результаты экспериментов

Исследование влияния на газодинамические характеристики HF-НХЛ коэффициента избытка вторичного горючего  $\alpha_2$  проводилось при оптимальном химическом составе топлива и расчетном (отвечающем давлению на срезе сопел 5 Тор) давлении в ГАФ  $p_c^* = 0.09$  МПа (соответствующий суммарный массовый расход реагентов составлял  $\sim 30$  г/с). Оптимальные безразмерные параметры  $\alpha_{\text{opt}} = 1.7$  и  $\psi_{\text{opt}} = 10$  определялись в соответствии с методикой [6], а коэффициент  $\alpha_2$  изменялся в диапазоне 5–23.

В каждом опыте варьировалось расстояние от среза СБ до оси зеркал-калориметров  $x_p$  и определялось его оптимальное значение ( $x_p^{\text{opt}} = 2.7 - 3.6$  см), при котором мощность излучения лазера максимальна. Исследование влияния на газодинамические характеристики HF-НХЛ давления в ГАФ выполнялось при оптимальном химическом составе топлива, коэффициенте  $\alpha_2 = 9$  (близком к оптимальному) и варьировании  $p_c$  в диапазоне  $0.7p_c^* \leq p_c \leq 1.7p_c^*$ .

### 2.1. Поля давлений и чисел Маха в потоке АС

Для удобства представления результатов использовалась система координат с началом, расположенным в плоскости среза СБ в его центре, причем ось  $x$  направлена вдоль потока АС, ось  $y$  – вдоль линии среза сопел, а ось  $z$  – вдоль боковой кромки сопла. В качестве базовых приняты сечения потока, удаленные по оси  $x$  от среза СБ на расстояния от 0.5 до 5 см с шагом 0.5 см.

Измеренные при трех значениях коэффициента  $\alpha_2$  профили полного давления за прямым скачком уплотнения  $p_{02}$  и статического давления  $p_s$  в набегающем потоке, часть которых показана на рис. 1, *a, б*, позволяют детально проанализировать газодинамику исследуемого потока АС. В частности, на них отчетливо видны места прохождения скачков уплотнения, которые оказывают определяющее влияние на конфигурацию рассматриваемых профилей, особенно на начальном участке течения, примыкающем к срезу СБ. Одной из причин возникновения скачков уплотнения может быть различие давлений на срезах сопел окислительного газа и вторичного горючего ( $p_{\text{H}_2} \neq p_{\text{F}}$ ). В этом случае от кромок сопел окислителя

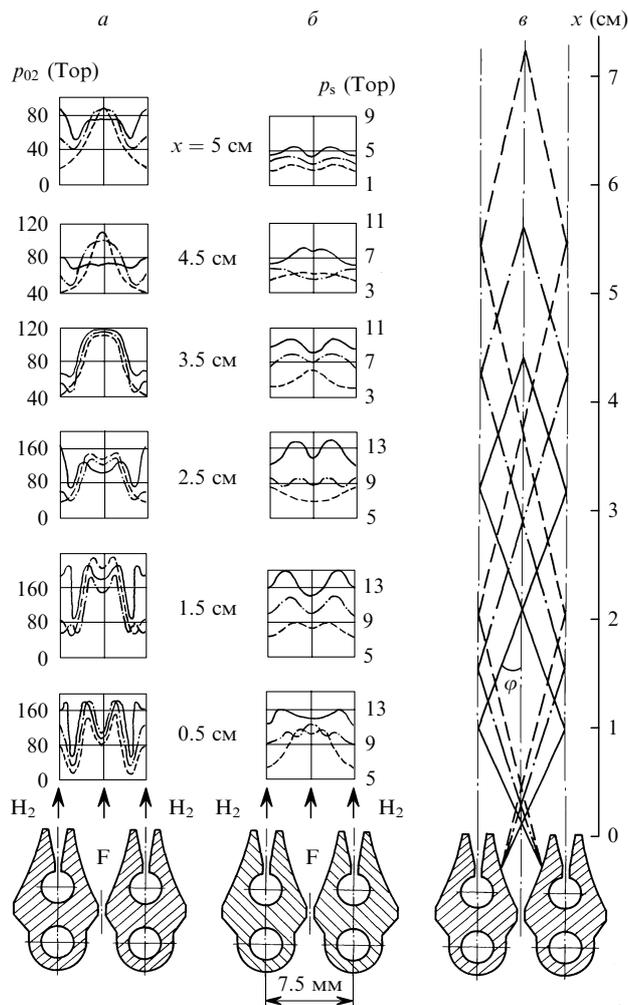


Рис. 1. Профили полного давления за прямым скачком уплотнения (*a*) и статического давления (*б*), измеренные на различном удалении  $x$  от среза СБ при коэффициентах избытка вторичного горючего  $\alpha_2 = 5$  (штриховые кривые), 9 (штрих-пунктир) и 23 (сплошные кривые), а также соответствующая им примерная структура скачков уплотнения в поле течения АС (*в*).

должны исходить пересекающиеся под некоторым углом косые скачки уплотнения. Вид профилей  $p_{02}$ , измеренных в сечении  $x = 0.5$  см, подтверждает такое предположение.

Конфигурация профилей, измеренных в последующих сечениях потока, обусловлена взаимодействием скачков уплотнения друг с другом, их отражением от осей симметрии струй, а также вязкостью и тепловыделением при протекании экзотермической химической реакции накачки  $F + H_2 \rightarrow HF(v) + H$ . Профили отличаются существенно неоднородным характером, который сохраняется на протяжении всей активной зоны ( $x \leq 7$  см), причем степень неоднородности с ростом коэффициента  $\alpha_2$  увеличивается. Данный факт связан с интенсификацией смешения струй реагентов и подтверждается анализом кинограмм общей картины течения потока АС, согласно которым условная длина перемешивания [2] с ростом  $\alpha_2$  уменьшается. Указанное обстоятельство неблагоприятно отражается на оптическом качестве АС: увеличение коэффициента  $\alpha_2$  от 5 до 23 приводит к уменьшению числа Штреля  $Sh$  от 0.72 до 0.45.

Наличие на профилях полного давления характерных «следов» скачков уплотнения (рис. 1, *a*) позволило установить их примерную структуру, показанную на рис. 1, *в*. С

ростом коэффициента избытка вторичного горючего, сопровождающимся увеличением различия между  $p_{H_2}$  и  $p_F$ , струя на срезе окислительного сопла становится все более «перерасширенной» по отношению к соседним струям вторичного горючего, а интенсивность индуцируемого при их динамическом взаимодействии косоугольного скачка уплотнения возрастает. Вследствие этого угол наклона  $\varphi$  фронта скачка к вектору скорости набегающего потока окислительного газа при варьировании  $\alpha_2$  в диапазоне 5–23 увеличивается на  $5^\circ$  (от  $17^\circ$  до  $22^\circ$ ). По мере удаления от среза СБ период ромбовидной скачковой структуры растет, что является следствием расширения газового потока как единого целого при его истечении из сопла в барокамеру в режиме свободной струи.

Распределения полного и статического давлений, а также чисел Маха вдоль потока АС приведены на рис.2 для трех характерных направлений течения: вдоль осей сопел окислительного газа и вторичного горючего и вдоль их границы (слоя смешения). Осевые распределения давлений (рис.2, а, б, г, д) характеризуются периодической структурой, которая формируется за счет отражения косых скачков уплотнения от осей симметрии струй. Положения максимумов и минимумов статического давления в струях реагентов на начальном участке течения находятся в противофазе, что хорошо согласуется как с общей картиной течения, выявленной с помощью кино съемки, так и с расчетами, выполненными с использованием математической модели на базе полной системы уравнений Навье–Стокса в [7].

Измеренное на срезе окислительного сопла статическое давление  $p_s \sim 11$  Тор в 1.5 раза превышает рассчитанное по изоэнтропическим соотношениям, что может быть вызвано двумя факторами: сжатием струи окислительного газа при переходе через фронт косоугольного скачка уплотнения, исходящего из сопла, и вязкостью, приводящей к уменьшению эффективной степени расширения сопла. По мере удаления от среза СБ наблюдается умень-

шение среднего статического давления, обусловленное расширением струи в свободное пространство барокамеры, которое происходит вплоть до выравнивания давлений в центральной части потока и в окружающем пространстве. Как показали эксперименты, этот процесс завершается на расстоянии  $x \sim 10$  см от среза сопел. С ростом коэффициента  $\alpha_2$  полное и статическое давление в потоке увеличиваются, а экстремумы их распределений смещаются к срезу СБ вследствие отмеченного выше увеличения угла  $\varphi$ .

Распределения чисел Маха вдоль осей сопел реагентов (рис.2, ж, з) также имеют периодический характер, который обусловлен отмеченными выше причинами. В слое смешения (рис.2, и) число Маха  $M = 2$  и слабо зависит от коэффициента  $\alpha_2$ . Однако при  $x > 3.5$  см число Маха вниз по потоку увеличивается. По-видимому, в этой области ускорение потока за счет его расширения как единого целого превалирует над его торможением за счет возмущений на скачках уплотнения и тепловыделения в ходе экзотермических физико-химических превращений.

С ростом  $\alpha_2$  область интенсивного роста числа Маха приближается к срезу СБ, что косвенно подтверждает предположение об интенсификации смешения струй реагентов. Оказалось, что в выходном сечении окислительного сопла измеренное число Маха  $M_1 = 3.5$  ниже рассчитанного  $M_2 = 4.2$ . Данное различие можно объяснить двумя причинами. Во-первых, из-за несогласованности давлений в выходных сечениях сопел вторичного горючего и окислительного газа в последних может иметь место отрыв потока (рис.1, в). Во-вторых, окислительные сопла исследуемого лазера являются радиальными (профиль их сверхзвуковой части образован дугой окружности). Экспериментальное исследование аэродинамики таких сопел [8] показало, что они характеризуются интенсивной скачковой структурой, приводящей к значительным потерям полного давления и, соответственно, к уменьшению числа Маха.

Влияние давления в ГАФ на газодинамические характеристики НФ-НХЛ сказывается, главным образом, на темпе выравнивания неоднородностей полей давлений в потоке АС и на полном давлении. Темп выравнивания неоднородностей с ростом  $p_c$  уменьшается. Этот эффект, по-видимому, связан со снижением скорости смешения струй реагентов при увеличении  $p_c$ , что подтверждается и результатами обработки кинограмм. Полное давление АС при увеличении  $p_c$  растет более интенсивно, чем при увеличении коэффициента  $\alpha_2$ .

## 2.2. Потери полного давления в потоке АС

Потери полного давления в потоке АС принято характеризовать средним коэффициентом восстановления давления  $\bar{\sigma} = \bar{p}_{01}/p_c$ , где  $\bar{p}_{01}$  – усредненное полное давление в набегающем потоке АС, определяемое по усредненным (путем интегрирования в пределах периода сопловой решетки ( $0 \leq y \leq 7.5$  мм)) профилям давлений  $p_{02}$  и  $p_s$ . Как следует из рис.3, а, потери полного давления в газодинамическом тракте лазера довольно велики и зависят от коэффициента избытка вторичного горючего, с ростом которого за счет подъема давления в струях водорода полное давление в потоке АС увеличивается. У дальней границы зоны генерации ( $x \sim 5$  см) при увеличении  $\alpha_2$  от 5 до 23 коэффициент  $\bar{\sigma}$  возрастает примерно в 1.5 раза.

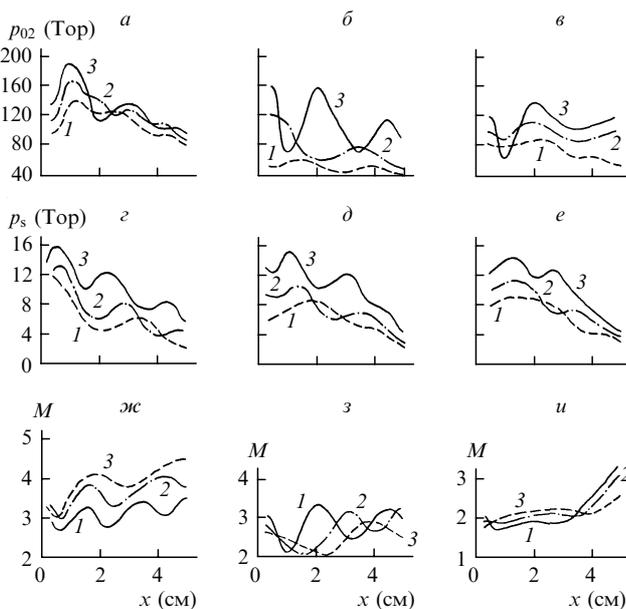


Рис.2. Продольные распределения полного давления за прямым скачком уплотнения (а–в), статического давления (г–е) и чисел Маха (ж–и) в потоке АС при коэффициентах избытка вторичного горючего  $\alpha_2 = 5$  (1), 9 (2) и 23 (3), соответствующие течению вдоль направления осей сопел окислительного газа (а, г, ж) и вторичного горючего (б, д, з), а также вдоль слоя смешения (в, е, и).

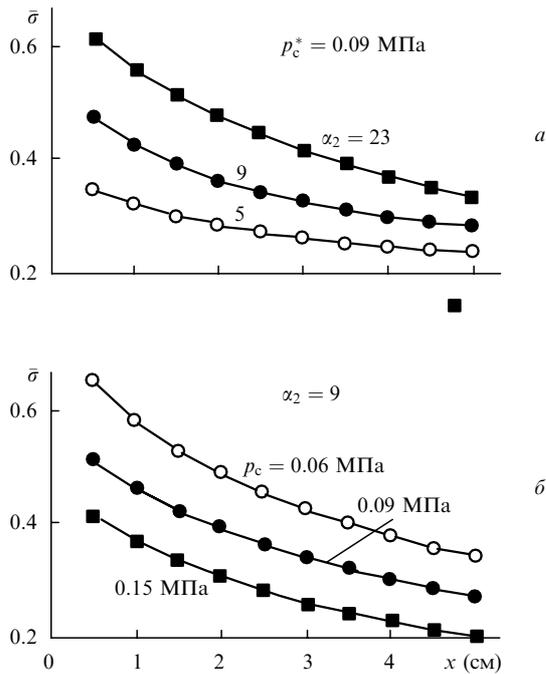


Рис.3. Продольные распределения усредненного коэффициента восстановления давления потока АС  $\bar{\sigma}$  при  $p_c^* = 0.09$  МПа и  $\alpha_2 = 5, 9$  и  $23$  (а), а также при  $\alpha_2 = 9$  и  $p_c = 0.06, 0.09$  и  $0.15$  МПа (б).

Несколько неожиданным оказалось снижение коэффициента восстановления давления с ростом  $p_c$  (рис.3,б). Так, при  $p_c = 0.15$  МПа (кривая б) коэффициент  $\bar{\sigma}$  в 1.4 раза ниже, чем при расчетном давлении  $p_c^* = 0.09$  МПа (кривая 5), а при  $p_c = 0.06$  МПа (кривая 4) он в 1.25 раза выше. Это может быть связано с увеличением при повышении давления в полости ОР интенсивности скачков уплотнения, обусловленных горением.

**2.3. Газодинамика АС и энергетика лазера**

Зависимости мощности излучения  $N$  исследуемого HF-лазера и его удельного энергосъема  $N_\Sigma$  от коэффициента избытка вторичного горючего представлены на рис.4,а. В исследованной области изменения  $\alpha_2$  ( $5 \leq \alpha_2 \leq 23$ ) эти зависимости являются весьма слабыми: оптимальное значение  $\alpha_2^{opt} = 12 - 13$ , однако оно может быть существенно снижено без заметного уменьшения энергетических характеристик лазера. Достаточно сказать, что двукратное уменьшение расхода водорода относительно его оптимального расхода ( $\alpha_2^{opt} = 12$ ) приведет к снижению мощности излучения лишь на  $\sim 10\%$ . С другой стороны, при уменьшении  $\alpha_2$  степень неоднородности полей полного и статического давлений в потоке также снижается (рис.1,а,б), что позволяет рассчитывать на повышение оптического качества АС. Следовательно, с точки зрения достижения высоких энергетических параметров излучения в дальней зоне режимы с низкими  $\alpha_2$  могут рассматриваться как более предпочтительные. Вместе с тем уменьшение  $\alpha_2$  снижает эффективность восстановления полного давления потока АС, т. к. приводит к уменьшению коэффициента  $\bar{\sigma}$  (рис.3,а).

Что же касается давления в ГАФ, то, как показали эксперименты, его уменьшение сопровождается улучшением как энергетических (растет удельный энергосъем (рис.4,б)), так и газодинамических (уменьшаются потери полного давления (рис.3,б)) характеристик лазера. В подобной ситуации одним из критериев выбора оптималь-

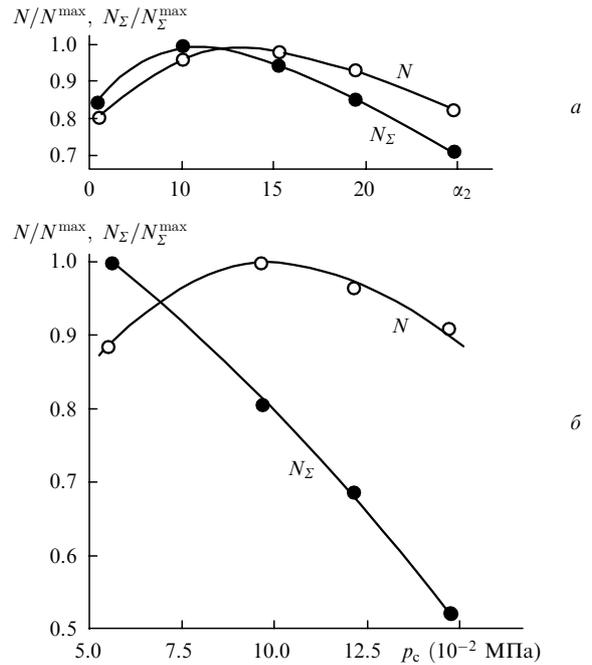


Рис.4. Нормированные зависимости мощности излучения  $N$  и удельного энергосъема  $N_\Sigma$  HF-НХЛ от коэффициента избытка вторичного горючего  $\alpha_2$  (а) и давления в ГАФ  $p_c$  (б).

ных значений  $p_c$  и  $\alpha_2$  может служить достижение максимальной мощности излучения  $N^{max}$ . Критическим параметром является также произведение нормированной мощности излучения на число Штреля ( $N/N^{max}$ )Sh. Этот обобщенный критерий, предложенный в [9], позволяет определить области допустимых изменений режимных параметров HF-лазера исследованного типа, при которых обеспечивается сочетание достаточно высокой энергетика лазера и приемлемого оптического качества АС.

**2.4. Влияние давлений струй реагентов на газодинамику АС**

Как отмечено выше, одним из параметров, определяющих газодинамическую картину течения в полости ОР, является отношение давлений струй вторичного горючего и окислительного газа  $p_{H_2}/p_F$ . В связи с этим возникает вопрос о влиянии этого параметра на энергетические характеристики лазера рассматриваемой конструкции.

В ходе экспериментов были реализованы условия, при которых  $0.4 \leq p_{H_2}/p_F \leq 1.5$ . Оптимальным с точки зрения достижения максимальной мощности излучения оказалось отношение  $p_{H_2}/p_F = 0.8$ , отвечающее ситуации, при которой статическое давление на срезе сопла окислительного газа несколько выше, чем на срезе сопла вторичного горючего. Этот результат хорошо согласуется с выводами расчетно-теоретического анализа [10].

Таким образом, на основании проведенных исследований сформулированы критерии оптимизации работы сверхзвукового HF-НХЛ.

Авторы выражают признательность А.В.Веселовскому, С.В.Конкину и В.Л.Мошкову за участие в измерениях и помощь при проведении экспериментов.

1. Ребонэ В.К., Ротинян М.А., Федоров И.А. и др. *Квантовая электроника*, **24**, 880 (1997).
2. Федоров И.А. *Непрерывные химические лазеры на рабочих молекулах фтористого водорода и фтористого дейтерия. Кн.2* (С.-Петербург, Изд-во Балт. гос. техн. ун-та, 1994).

3. Петунин А.Н. *Методы и техника измерений параметров газового потока* (М., Машиностроение, 1972).
4. Галаев И.И., Конкин С.В., Ребонэ В.К., Федоров И.А. *ПТЭ*, № 1, 122 (1997).
5. Башкин А.С., Борейшо А.С., Лобачев В.В. и др. *Квантовая электроника*, **23**, 428 (1996).
6. Ребонэ В.К., Ротинян М.А., Федоров И.А. и др. *Квантовая электроника*, **23**, 707 (1996).
7. Shur M. *Proc. VII Intern. Conf. on Numer. Meth. in Laminar and Turbulent Flows* (Stanford, USA, 1991, v.7, pt.2, p.1526).
8. Кталхерман М.Г., Мальков В.М., Рубан Н.А. В сб. *Исследование рабочего процесса газодинамических и химических лазеров* (Новосибирск, Изд-во ИТПМ СО АН СССР, 1979, с.3).
9. Лобачев В.В., Федоров И.А. *Оптика и спектроскопия*, **82**, 153 (1997).
10. Rotinian M., Shur M., Strelets M. *Proc. XXV Intern. Symp. on Combustion* (Irvine, USA, 1994, p.13).

**I.A.Fedorov, M.A.Rotinyan, A.M.Krivitskii. Gas dynamics of an active medium of a supersonic CW chemical HF laser.**

Gas-dynamic characteristics of a 5-kW supersonic cw chemical HF laser with a nozzle array of size  $25 \times 2.8$  cm and the nozzle–nozzle mixing scheme were experimentally studied. The distributions of Mach numbers, static pressure, total pressure behind the normal shock wave, and the loss of total pressure in the flow of an active medium in wide ranges of secondary-fuel (hydrogen) mass flows and pressures in an atomic-fluorine generator were measured. The energy laser characteristics were found to be interrelated with the gas dynamics and the optical quality of the active medium.