

Таким образом, возможность существенного увеличения размеров установки определяется лишь технологическими соображениями. Опыт проектирования и изготовления установки А-1 показывает возможность увеличения масштаба, по крайней мере, в 4 раза без привлечения для ее изготовления специального крупного технологического оборудования, так как габариты наиболее крупных деталей не превысят 1,5 м. В этом случае числа Re и время рабочего режима увеличатся в 4 раза.

В случае сохранения времени рабочего режима в диапазоне 15 мс возможно увеличение чисел Re в 8 раз, при этом динамические нагрузки, хотя и возрастут, все же останутся в пределах допустимых величин. Однако в связи с увеличением взаимной скорости движения элементов конструкции устройства автоподжата может потребоваться доработка системы уплотнения форкамеры.

На фиг. 3 показаны границы области моделирования для систем типа А-1 увеличенного в 4 раза масштаба для времени рабочего режима 60 и 15 мс (кривые 7, 8 соответственно).

Можно видеть, что при таких размерах установки на ней возможно натурное по числам M и Re моделирование течения практически для всех задач современной гиперзвуковой аэродинамики. Использование в качестве рабочего газа воздуха открывает возможности исследований течений в моделях гиперзвуковых прямоточных ВРД совместно с воздухозаборником.

Поступила 5 I 1981

ЛИТЕРАТУРА

1. Мачехина Г. П., Хвостов Н. И. Перспективы развития аэродинамической экспериментальной базы за рубежом.— *Обзоры ЦАГИ*, 1976, № 490.
2. Гавриленко Т. П., Топчий М. Е. и др. Газодинамические параметры истечения азота с высокими начальными давлениями.— В сб.: *Аэродинамика. Труды I Сибирской конф.* Новосибирск: Наука, 1973.
3. Параццоли Ц., Энкенус К. Р. Эффекты плотного газа в гиперзвуковой аэродинамической трубе со свободным поршнем.— *РТК*, 1970, т. 8, № 1.
4. Ричардс Б. Е., Энкенус К. Р. Гиперзвуковые исследования, проведенные в аэродинамической трубе со свободным поршнем.— *РТК*, 1970, т. 8, № 6.
5. Von Karman Institute for Fluid Dynamics. Education and Research 1956—1976.
6. Мачехина Г. П., Хвостов Н. И. Аэродинамические трубы для исследования при больших числах Рейнольдса.— *Обзоры ЦАГИ*, 1971, № 353.
7. Lucasiewicz J.— In: *Experimental Methods of Hypersonics*. Vol. 3. N. Y., 1973.
8. Мещеряков А. А., Пинаков В. И., Топчий М. Е. О распределении напряжений в заклиниваемом поршне и стволе системы адиабатического сжатия газа.— *ИМТФ*, 1980, № 2.
9. Бошнятов Б. В., Королев А. С. и др. Импульсные трубы в аэродинамических исследованиях. Новосибирск: Наука, 1978.
10. Техника гиперзвуковых исследований/Под ред. Г. Ф. Бураго. М.: Мир, 1964.
11. *Advances in hypervelocity techniques*. N. Y.: Plenum Press, 1962.
12. Lucasiewicz J. Experimental investigation of hypervelocity flight.— In: 1st Int. Congr. of the Aeronautical Sciences. Madrid, 1958.

УДК 541.124/128

ВЛИЯНИЕ ФОРМЫ СВЕРХЗВУКОВОЙ ЧАСТИ СОПЛА НА СКОРОСТЬ ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЯ МОЛЕКУЛ ПО КОЛЕБАТЕЛЬНЫМ УРОВНЯМ В АКТИВНОЙ СРЕДЕ СО-ГДЛ

Н. Я. Василик, А. Д. Марголин, В. М. Шмелев

(Москва)

В большинстве экспериментальных работ, посвященных изучению газодинамических СО-лазеров [1—5], использованы конические сопла с полууглом раскрытия сверхзвуковой части $7,5$ — 12° , резонатор в этих работах находился на значительном ($0,5$ — 1 м) расстоянии от критического сечения сопла. Однако в работах [6, 7] экспери-

ментально показана возможность создания СО-ГДЛ с более короткими соплами (полуугол раскрытия 26° , расстояние от критического сечения сопла до оси резонатора 0,065 м). Проведенные в работах [8—11] теоретические исследования показали, что процесс колебательной релаксации в активной среде газодинамического СО-лазера можно разбить на две области. В первой области (вблизи критического сечения сопла при высокой температуре и высоком давлении) происходит наиболее интенсивная дезактивация колебательной энергии, во второй области (при низких давлениях и температурах) колебательно-поступательная дезактивация замедляется, так как основным является процесс перераспределения молекул по колебательным уровням. Для того чтобы обеспечить эффективное «замораживание» колебательной энергии, необходимо за минимально короткое время перевести газ из первой области во вторую, т. е. в первой области необходимы минимальный диаметр сопла и максимально возможный угол раскрытия. Вопрос о том, каким должен быть профиль сопла во второй области, чтобы обеспечить достижение максимального значения оптического коэффициента усиления активной среды на минимальном расстоянии от критического сечения сопла, не изучен. В данной работе представлены результаты расчетных исследований процесса колебательной релаксации молекул окиси углерода в сверхзвуковых потоках с различной геометрией расширения.

Рассматривается стационарное, квазиодномерное, адиабатическое течение смеси СО—Аг в плоском сверхзвуковом сопле заданной конфигурации вдоль оси x . Предполагается, что в релаксационных процессах участвуют только одноквантовые переходы и в каждой точке потока имеет место равновесие между поступательными и вращательными степенями свободы. В критическом сечении сопла предполагается равновесие по всем степеням свободы. Уравнения кинетики колебательной релаксации в рамках перечисленных допущений записываются в виде

$$(1) \quad u \frac{dC_v}{dx} = K_{v+1,v} C_{v+1} N - (K_{v,v-1} + K_{v,v+1}) C_v N + \\ + K_{v-1,v} C_{v-1} N + \left\{ \left(\sum_{w=0}^{w^*} K_{v+1,v}^{w,w+1} C_w \right) C_{v+1} - \right. \\ \left. - \left[\left(\sum_{w=0}^{w^*} K_{v,v-1}^{w,w+1} C_w \right) + \left(\sum_{w=1}^{w^*} K_{w,w-1}^{v,v+1} C_w \right) \right] C_v + \right. \\ \left. + \left(\sum_{w=1}^{w^*} K_{w,w-1}^{v-1,v} C_w \right) C_{v-1} \right\} + A_{v+1,v} C_{v+1} - A_{v,v-1} C_v,$$

где $v = 0, 1, \dots, v^*$; $w = 0, 1, \dots, w^*$; u — скорость газового потока; C_v — населенность v -го колебательного уровня; $K_{v+1,v}$ и $K_{v+1,v}^{w,w+1}$ — константы скоростей колебательно-поступательных и колебательно-колебательных переходов соответственно; N — полное число молекул в единице объема; $K_{v+1,v} = (K_{v+1,v}^{\text{CO}} \psi_{\text{CO}} + K_{v+1,v}^{\text{Ar}} \psi_{\text{Ar}})$; $K_{v+1,v}^{\text{CO}}$ и $K_{v+1,v}^{\text{Ar}}$ — константы скоростей колебательно-поступательной дезактивации молекул окиси углерода на $v+1$ -м уровне при столкновениях с молекулами СО и Аг соответственно; ψ_{CO} и ψ_{Ar} — молярные концентрации окиси углерода и аргона; $A_{v,v-1}$ — коэффициент Эйнштейна для переходов $v \rightarrow v-1$. Система релаксационных уравнений (1) решалась совместно с уравнениями неразрывности среды, сохранения количества движения, энергии, с уравнением состояния идеального газа и начальными условиями, задаваемыми в критическом сечении сопла. В работе рассчитывались населенности колебательных уровней и оптические коэффициенты усиления среды.

Коэффициент усиления для колебательно-вращательных переходов $v, j-1 \rightarrow v-1, j$ рассчитывался с использованием следующих выражений:

$$\alpha_{v,j} = \frac{\lambda_{v,v-1}^2 A_{v,v-1} [\ln(2)]^{1/2}}{8\pi^{3/2} \Delta v_D} \left(C_{v,j-1} - \frac{g_{v,j-1}}{g_{v-1,j}} C_{v-1,j} \right) H[a, 0], \\ H[a, 0] = \frac{a}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\exp(-y^2)}{y^2 + a^2} dy, \quad a = \frac{\Delta v_c}{\Delta v_D} (\ln 2)^{1/2},$$

где $\Delta\nu_D = \frac{1}{\lambda_{v,v-1}} \left(\frac{2RT \ln 2}{\mu} \right)^{1/2}$ — доплеровская полуширина линии;
 $\Delta\nu_c = p \left(\frac{300}{T} \right)^{0,7} \sum_M \delta_{CO-M}(300, j) \psi_M$ — столкновительная полуширина
 линии; p и T — давление и поступательная температура газа; δ_{CO-M} — значе-
 ние полуширины спектральной линии из-за столкновений молекул CO с
 вращательным квантовым числом j с молекулами M -го сорта при темпера-
 туре 300 К [12, 13]; $\lambda_{v,v-1}$ — длина волны излучения для колебательно-
 вращательного перехода; $g_{v,j-1} = 2j - 1$; $g_{v-1,j} = 2j + 1$.

Учитывая равновесие между поступательными и вращательными
 степенями свободы, получим

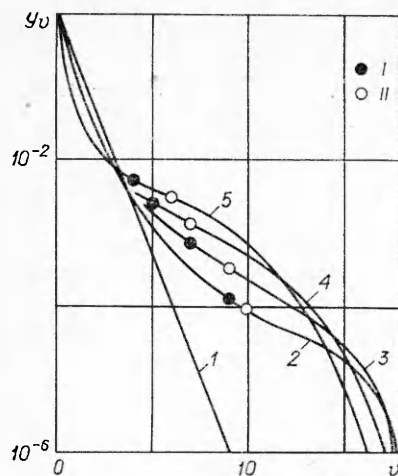
$$C_{v,j-1} = g_{v,j-1} C_v \frac{B_v}{T} \exp(-B_v(j-1)j/T),$$

B_v — характеристическая вращательная температура v -го уровня. При
 расчетах использованы константы скоростей колебательно-поступатель-
 ной дезактивации и колебательно-колебательного обмена с учетом реко-
 мендаций работ [10, 14, 15].

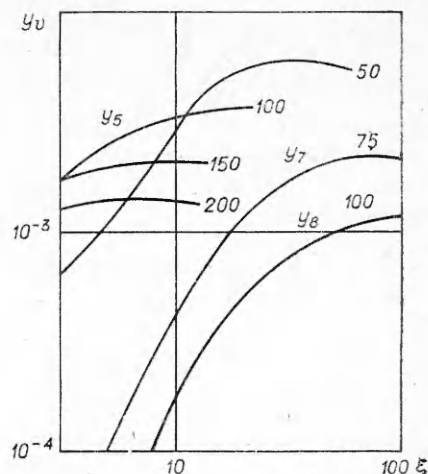
Населенности колебательных уровней молекул окиси углерода в
 различных сечениях сверхзвукового потока рассчитывались путем числен-
 ного интегрирования системы (1) совместно с уравнениями сохранения
 массы, импульса и энергии идеального газа. Начальные условия задава-
 лись в критическом сечении сопла. В расчетах учитывалось 26 колебатель-
 ных уровней $v = 0, 1, \dots, 25$, населенности уровней с номерами $v \geq 26$
 принимались равными нулю. Рассматривалось движение газа в плоских
 клиновидных соплах с полууглом раскрытия $\varphi = 26,5^\circ$, высотой крити-
 ческого сечения сопла $h_* = 3 \cdot 10^{-3}$ м. Расширяющийся участок сопла
 переходит в канал постоянного сечения при следующих степенях расши-
 рения газового потока: $S/S_* = 24,9; 40,1; 79,2; 199$. Кроме того, прове-
 дены расчеты в предположении мгновенного расширения газового потока.
 В этом случае сразу за критическим сечением сопла газ охлаждается до
 заданной поступательной температуры.

Расчеты, проведенные для клиновидных сопел, состыкованных с ка-
 налом постоянного сечения, показали, что на одном и том же расстоянии от
 критического сечения сопла (при фиксированном составе, фиксированных
 давлении и температуре в критическом сечении сопла) отклонение значе-
 ний населенностей колебательных уровней от начального распределения
 тем сильнее, чем до более низких температур расширен газ. Это утвержде-
 ние справедливо для колебательных уровней с номерами v , равными или
 на несколько единиц большими номера $v_m(x) = [(1 - 2\varepsilon)/\varepsilon T + T1]/(2T1)$,
 соответствующего минимуму триноровского распределения ($T1(x)$ — зна-
 чение колебательной температуры первого уровня в сечении, расположен-
 ном на расстоянии x от критического сечения сопла, ε — ангармонизм
 молекул CO).

Распределения молекул окиси углерода по колебательным уровням
 для сопел с клиновидным расширяющимся участком в критическом сече-
 нии (прямая 1) и на расстоянии $6 \cdot 10^{-2}$ м от критического сечения сопла
 ($\xi = (x \operatorname{tg} \varphi)/h_* = 100$) (кривые 2—5) приведены на фиг. 1 для $p_* =$
 $= 10$ Па, $T_* = 2000$ К, состав среды 0,2 CO + 0,8 Ar, $y_v = C_v/N$ —
 относительная концентрация молекул. Перечисленному выше набору сте-
 пеней расширения клиновидных сопел соответствуют следующие посту-
 пательные температуры: 200; 150; 100; 57,9 К (кривые 2—5 соответствен-
 но). Точки I — колебательные уровни, номера которых равны округлен-
 ному до целого значению $v_m(x)$, точки II — верхние колебательные уров-
 ни перехода с максимальным значением оптического коэффициента уси-
 ления. При движении газа в канале постоянного сечения, пристыкован-
 ного к расширяющейся части сопла, имеет место увеличение населенностей
 уровней с номерами, близкими к v_m , и оптического коэффициента усиления,



Ф и г. 1



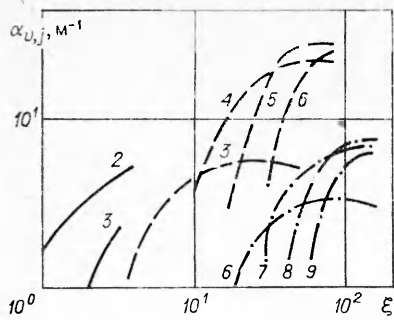
Ф и г. 2

однако эти процессы происходят медленнее (в смеси 0,2 CO + 0,8 Ar), чем в расширяющемся сопле без канала постоянного сечения.

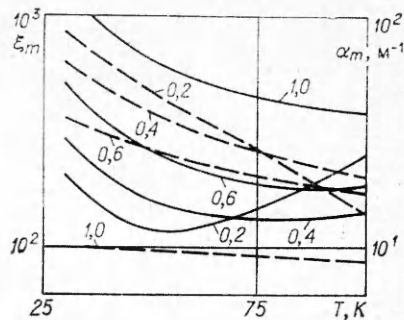
На основании проведенных расчетов можно заключить, что при движении газа в расширяющемся сопле происходит монотонное смещение положения максимума коэффициента усиления в пространстве колебательных уровней в сторону меньших v . Максимальное значение коэффициента усиления соответствует переходам $v_m + 2 \rightarrow v_m + 1$; $v_m + 1 \rightarrow v_m$. Данный вывод подтверждается результатами экспериментов [2]. В этих экспериментах при глубоком охлаждении смеси 5% CO + 15% N₂ + 80% Ar в расширяющемся сопле ($S/S_* = 2730$) параметр v_m , характеризующий положение минимума триноровского распределения в пространстве уровней, достигал своего минимального значения ($v_m = 1$). Изучение спектрального состава излучения на выходе сопла [2] показало, что наиболее интенсивная генерация происходила на переходе $2 \rightarrow 1$, т. е. на переходе $v_m + 1 \rightarrow v_m$.

Смещение максимума коэффициента оптического усиления в сторону меньших v , обусловленное охлаждением газа при расширении, приводит к сокращению пути молекул CO в пространстве уровней с нижних колебательных уровней до уровня, соответствующего максимуму оптического коэффициента усиления. В то же время расширение газа сопровождается уменьшением числа молекул в единице объема и замедлением процесса передачи квантов с нижних колебательных уровней на верхние.

Для того чтобы выяснить, как зависят скорости изменения населенностей колебательных уровней от степени расширения газового потока, рассмотрим движение газа в условиях мгновенного расширения. В этом случае сразу после критического сечения в газе устанавливаются значения поступательной температуры, давления и скорости, соответствующие заданной степени расширения. Рассматривалось расширение газа до температур 30—200 К. Расчеты выполнены для следующей области изменения параметров: температура в критическом сечении сопла $T_* = 1000—3000$ К, давление в критическом сечении сопла $5 \cdot 10^6—10^7$ Па, концентрация окиси углерода $\psi_{CO} = 0,2—1,0$. Результаты расчетов для $T_* = 2000$ К, $p_* = 10^7$ Па, $\psi_{CO} = 0,2$ представлены на фиг. 2, 3. На фиг. 2 приведены значения населенностей колебательных уровней с номерами 5, 7, 8 в виде функций расстояния от критического сечения сопла, числа возле линий соответствуют поступательным температурам газа. На фиг. 3 приведены зависимости коэффициентов оптического усиления от расстояния до критического сечения сопла в условиях мгновенного расширения активной среды до поступательных температур 30; 50; 100 К (сплошные, штриховые



Ф и г. 3

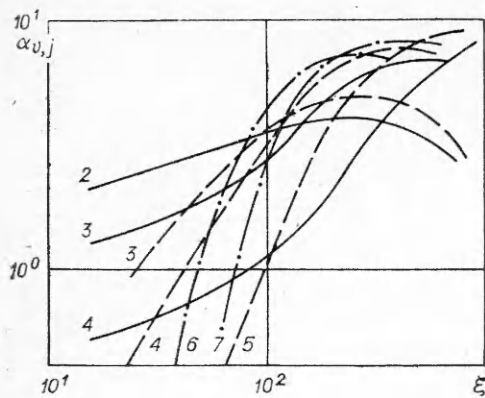


Ф и г. 4

и штрихпунктирные линии соответственно), цифры возле кривых соответствуют колебательным квантовым числам верхних для данной линии излучения уровней. Коэффициенты усиления максимальные для колебательно-вращательной полосы.

На основании результатов расчетов показано, что для фиксированного колебательного уровня при увеличении степени расширения газового потока длина пути в канале постоянного сечения, на котором формируется квазистационарное значение населенностей данного уровня, увеличивается. Это обстоятельство иллюстрируется на фиг. 2 кривыми, характеризующими изменение населенностей пятого уровня в зависимости от расстояния до критического сечения сопла при расширении активной среды до поступательных температур 50—200 К. Увеличение расстояния, необходимого для выхода населенности на квазистационарное значение, объясняется как замедлением процессов перераспределения молекул, так и увеличением квазистационарного значения населенности колебательных уровней с уменьшением поступательной температуры. Однако, поскольку положение максимума оптического коэффициента усиления при увеличении степени расширения газового потока монотонно смещается в сторону меньших ν (см. фиг. 3), расстояние в пространстве уровней, которое проходят молекулы с нижних уровней до уровней, соответствующих максимальному коэффициенту усиления, сокращается. Такое сокращение пути молекул для активной среды, содержащей значительное (более 40%) количество аргона при расширении в сверхзвуковом сопле от $T_* = 2000$ К до поступательных температур $T = 50—200$ К, компенсирует замедление процессов $V—V$ -обмена из-за уменьшения плотности и температуры газа при расширении. Расстояния, необходимые для достижения максимальных значений коэффициентов усиления и квазистационарных значений населенностей колебательных уровней, соответствующих максимальным коэффициентам усиления для указанных условий, уменьшаются с увеличением степени расширения газового потока. На фиг. 4 приведены зависимости расстояний ξ_m (сплошные линии), на которых достигаются максимальные коэффициенты усиления, от поступательной температуры газа в канале постоянного сечения для смесей с различным содержанием окиси углерода (числа у линий соответствуют различным значениям ψ_{CO}) при расширении от $T_* = 3000$ К, $p_* = 10^7$ Па. Проведенные расчеты показали, что для каждого состава рабочей среды при заданном запасе колебательной энергии существует степень расширения газового потока, при которой ξ_m минимально. Уменьшение содержания аргона в активной среде приводит к смещению положения минимума ξ_m в сторону меньших степеней расширения газового потока, что объясняется более резким уменьшением плотности в смесях с меньшим содержанием аргона при охлаждении до одних и тех же температур.

Во всей исследованной области изменения составов активной среды и степеней расширения газового потока максимальный коэффициент усиления активной среды СО-ГДЛ монотонно растет с увеличением степени



Ф и г. 5

расширения газового потока. Значения максимальных коэффициентов усиления α_m для $T_* = 3000$ К, $p_* = 10^7$ Па в функции поступательной температуры газа в канале постоянного сечения приведены на фиг. 4 (штриховые линии), цифры у линий соответствуют значениям молярной концентрации окиси углерода. Увеличение максимальных значений оптического коэффициента усиления при уменьшении температуры рабочей среды определяется как изменением распределения молекул по вращательным уровням, так и смещением положения максимума коэффициента усиления в пространстве уровней в сторону меньших колебательных квантовых чисел, так как при заданном запасе колебательной энергии в единице массы газа чем меньше $\nu_m + 1$ (а значит, меньше E_{ν_m+1}), тем большая доля молекул окиси углерода может быть сосредоточена на уровне, соответствующем максимальному значению коэффициента усиления.

В смесях CO+Ag с содержанием окиси углерода $\psi_{CO} \leq 0,6$, несмотря на то что параметр ξ_m проходит через минимум в области степеней расширения, обеспечивающих охлаждение до температур 30—100 К, коэффициент усиления на всех участках канала постоянного сечения тем выше, чем меньше поступательная температура газа. Увеличение коэффициента усиления в этих смесях за счет уменьшения поступательной температуры активной среды компенсирует его уменьшение за счет уменьшения плотности и за счет замедления процессов перераспределения молекул окиси углерода по колебательным уровням. Следовательно, для того чтобы обеспечить наибольший оптический коэффициент усиления на заданном расстоянии от критического сечения сопла в активной среде CO-ГДЛ, содержащей более 40% инертного газа, необходимо выбирать такой профиль сопла, который обеспечивает максимально быстрое (насколько это позволяют условия газодинамики) расширение активной среды. Степень расширения газового потока должна быть максимальной (в наших расчетах рассмотрены степени расширения, обеспечивающие охлаждение газового потока до 30 К) и определяется условиями отсутствия конденсации рабочей среды.

В смесях с малым содержанием инертного газа, в частности в чистой окиси углерода, максимальный оптический коэффициент усиления монотонно увеличивается при уменьшении температуры активной среды за счет увеличения степени расширения газового потока, однако замедление процессов V—V-обмена, обусловленное уменьшением плотности и температуры, приводит к тому, что для сверхзвуковых сопел заданной длины увеличение степени расширения может уменьшить коэффициент усиления активной среды. Зависимости оптических коэффициентов усиления на различных уровнях (цифры у кривых) в чистой окиси углерода от расстояния до критического сечения сопла для случая мгновенного расширения приведены на фиг. 5 ($p_* = 10^7$ Па, $T_* = 3000$ К, $\xi = x/2h_*$, $\psi_{CO} = 1,0$, $T = 30; 50$ и 100 К — сплошные, штриховые и штрихпунктирные линии соответственно). Следовательно, для того чтобы получить на заданном расстоянии от критического сечения сопла наибольшее значение оптического коэффициента усиления в активной среде CO-ГДЛ при больших концентрациях окиси углерода $\psi_{CO} \sim 1$, профиль сверхзвуковой части сопла необходимо выбирать с учетом кинетики перераспределения молекул окиси углерода по колебательным уровням.

Поступила 16 XII 1980

ЛИТЕРАТУРА

1. Watt W. S. Carbon monoxide gas dynamic laser.— Appl. Phys. Lett., 1971, vol. 18, N 11.
2. McKenzil R. L. Laser power at 5 μ from the supersonic expansion of carbon monoxide.— Appl. Phys. Lett., 1970, vol. 17, N 10.
3. Белавин В. А., Абросимов Г. В. и др. Коэффициент усиления слабого сигнала в газодинамическом СО-лазере.— ЖТФ, 1977, т. 47, вып. 3.
4. Андронов Г. А., Армер А. Г. и др. Газодинамический лазер на смеси СО—Аг.— Квант. электроника, 1977, т. 4, № 8.
5. Александров Б. С., Андронов Г. А. и др. Исследование энергетических характеристик рабочих сред СО-ГДЛ.— ТВТ, 1978, т. 16, вып. 5.
6. Гавриков В. Ф., Дронов А. П. и др. Газодинамический лазер на окиси углерода.— Квант. электроника, 1974, т. 1, № 1.
7. Гавриков В. Ф., Дронов А. П. и др. Экспериментальное исследование ГДЛ на смесях СО с инертными газами.— Квант. электроника, 1975, т. 2, № 1.
8. Rich J. W. Kinetic modeling of the high-power carbon monoxide laser.— J. Appl. Phys., 1971, vol. 42, N 7.
9. Nanbu K. Vibrational relaxation of anharmonic oscillation in expansion nozzles.— J. Phys. Soc. Japan, 1976, vol. 40, N 5.
10. Гавриков В. Ф., Дронов А. П. и др. Колебательная релаксация окиси углерода в сверхзвуковых соплах.— Квант. электроника, 1976, т. 3, № 7.
11. Василик Н. Я., Вахненко В. А. и др. Энергетические характеристики газодинамического лазера на окиси углерода.— ПМТФ, 1978, № 5.
12. Williams D., Wenstrand D. C. et al. Collisional broadening of infra-red absorptions lines.— Molecular Physics, 1971, vol. 20, N 5.
13. Hunt R. H., Tath R. A., Plyler E. K. High-resolution determination of the width of self-broadened lines of carbon monoxide.— J. Chem. Phys., 1968, vol. 49, N 9.
14. Басов Н. Г., Долинина В. И. и др. Теоретическое исследование генерационных характеристик электроионизационного СО-лазера. Препринт ФИАН СССР, 1976, № 1.
15. Конев Ю. Б., Кочетов И. В. и др. Анализ кинетических процессов, определяющих параметры СО-лазеров. Препринт Ин-та атомной энергии, 1977, № 2821.

УДК 533.6.671; 533.6.011.3

К ВОПРОСУ О ПОДОБИИ ТЕЧЕНИЙ СПОНТАННО КОНДЕНСИРУЮЩЕГОСЯ ГАЗА В СВЕРХЗВУКОВЫХ СОПЛАХ

А. В. Чиризин

(Жуковский)

Вопросы подобия течений релаксирующих сред имеют особое значение в связи с чрезвычайной сложностью таких процессов. При этом традиционный метод выделения безразмерных комбинаций — параметров подобия — может оказаться малоэффективным. Такая ситуация возникает, когда необходимо одновременно удовлетворить большому количеству критериев, что зачастую делает невозможным точное моделирование явлений. В связи с этим более плодотворным может оказаться поиск условий приближенного или частичного моделирования, а также различных корреляционных зависимостей.

Одним из примеров релаксирующих сред являются двухфазные среды, общие условия подобия течений которых получены в [1]. Эта система параметров в сочетании с эмпирическими данными о некоторых особенностях явления применена в [2, 3] для случая спонтанной конденсации при стационарном и нестационарном течении переохлажденного пара. Сформулированное в [2, 3] полуэмпирическое подобие можно уточнить, если рассмотреть вопрос о граничных условиях и формах сопл, допускающих точное моделирование течений. С другой стороны, множество подобных течений можно расширить, пересмотрев с позиции точного моделирования принцип энтропийной корреляции скачков конденсации [4].

1. Спонтанная конденсация реального газа при его течении в соплах относится к сложным явлениям, особенности которого в ряде случаев изучены недостаточно. К ним можно отнести конденсацию в высокоскоростных сильно переохлажденных потоках, конденсацию газа с неравновесным состоянием внутренних степеней свободы молекул, конденсацию в многокомпонентной среде и т. д.