

18. О. В. Ачасов, Р. И. Солоухин, Н. А. Фомин. Квантовая электроника, 1978, 5, 11, 2337.  
19. А. В. Крауклис, В. Н. Крошко и др. ФГВ, 1976, 12, 5, 792.  
20. N. A. Fomin, R. I. Soloukhin. Rev. de Phys. Appl., 1979, 14, 2, 421.

### ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ТОРМОЖЕНИЯ, РАЗМЕРОВ И КОНТУРА СОПЛА НА КОЭФФИЦИЕНТ УСИЛЕНИЯ В ГДЛ НА ПРОДУКТАХ СГОРАНИЯ ЖИДКИХ УГЛЕВОДОРОДНЫХ ТОПЛИВ

М. Г. Кталхерман, В. М. Мальков, А. Ю. Шевырин, Г. Ю. Шейтельман  
(Новосибирск)

В настоящее время основным способом теплового возбуждения  $\text{CO}_2$ -ГДЛ является горение. Возможность получения с помощью горения больших расходов лазерноактивной среды обеспечивает получение высоких мощностей генерации в непрерывном режиме.

Одна из проблем, возникающих при практической реализации ГДЛ на продуктах горения, связана с выбором реагентов. В первых лабораторных устройствах такого типа [1], а также в крупных установках с уровнем мощности в десятки киловатт [2] в качестве топлива использовались окись углерода или дициан (с небольшим количеством  $\text{CN}_4$  или  $\text{H}_2$ ), а окислителем служил кислород или воздух. Смесь продуктов сгорания разбавлялась азотом для получения желаемого уровня температур. И хотя энергетические характеристики таких лазеров можно улучшить путем оптимизации параметров и использования в качестве окислителя закиси азота [3, 4], они обладают существенными недостатками: окись углерода и дициан токсичны, а топливная система ввиду малости удельного веса газа — весьма громоздка. Последнее справедливо и при работе ГДЛ на других газообразных топливах ( $\text{C}_2\text{H}_2$ ,  $\text{C}_3\text{H}_8$ ,  $\text{C}_2\text{H}_4$  и т. д.), дающих приемлемый состав продуктов сгорания. Поэтому внимание исследователей привлекает возможность использования простых и доступных жидких углеводородных топлив. В работе [5], посвященной окислителям, топливам и газогенераторам ГДЛ, отмечались компактность систем на жидком топливе, простота подачи и регулирования расхода.

В работах [3, 4, 6—8] проведен численный анализ характеристик газодинамического лазера, работающего на продуктах сгорания жидких углеводородов — бензола и керосина. Выбор этих топлив не случаен: при сжигании бензола содержание водяных паров в продуктах сгорания не слишком сильно отличается от оптимального даже при высоких температурах ( $\sim 2000$  К), а керосин — дешевое и доступное топливо.

В [3] вычислены коэффициенты усиления  $\alpha$  и максимальная запасенная энергия  $E$  на срезе сопла ГДЛ, работающего на продуктах горения бензоло-кислородной смеси, разбавленных азотом. Максимальные значения  $\alpha$  и  $E$  ( $\alpha = 1 \text{ м}^{-1}$ ,  $E = 24 \text{ кВт}/(\text{кг}/\text{с})$ ) получены в сопле с высотой критического сечения  $h^* = 0,3 \text{ мм}$  и степенью расширения  $A/A^* = 50$  при давлении и температуре в форкамере, равных соответственно  $P_\Phi = 37,5 \text{ атм}$ ,  $T_\Phi = 1800 \text{ К}$ . Если в качестве окислителя использовать  $\text{N}_2\text{O}$ , концентрация паров воды в смеси уменьшается и появляется возможность увеличить температуру торможения, что приводит к росту запасаемой колебательной энергии. Расчеты [3] показали, что для этого же сопла  $E \approx 40 \text{ кВт}/(\text{кг}/\text{с})$  при  $T_\Phi = 2100 \text{ К}$ .

В [4] решена оптимизационная задача для ГДЛ на продуктах сгорания бензола-воздушной смеси. Максимальное значение  $E$  определялось с наложением ряда ограничений на другие параметры. В результате получены оптимальные значения основных характеристик лазера:  $P_{\phi} = 30,1$  атм,  $T_{\phi} = 1955$  К,  $h^* = 0,15$  мм,  $A/A^* = 72$ ,  $\alpha = 1,37$  м<sup>-1</sup>,  $E = 40,3$  кВт/(кг/с).

Уменьшение содержания водяных паров может быть достигнуто путем предварительного нагрева воздуха. В [7] рассмотрен случай, когда начальная температура воздуха равнялась 1000 К. Применение бензола в этих условиях очень эффективно. При  $T_{\phi} = 2000$  К и  $P_{\phi} = 10$  атм на выходе из сопла с  $h^* = 0,2$  мм получены значения  $E = 55$  кВт/(кг/с) при  $A/A^* = 60$  и  $E = 45$  кВт/(кг/с) при  $A/A^* = 20$ .

Наиболее подробные исследования характеристик лазера, работающего на углеводородном топливе (бензол, керосин), выполнено в [8]. В расчетах предполагалось, что воздух сжимается до высокого давления и поступает в камеру сгорания подогретым за счет сжатия. Топливо сжигается при таком избытке воздуха, чтобы получить требуемую температуру в форкамере. Величина  $T_{\phi}$  варьировалась в пределах 1600—2400 К при  $p_{\phi} = 16 \div 49$  атм. Результаты вычислений для керосина и бензола различались незначительно. В обоих случаях получены высокие значения максимального коэффициента усиления и максимальной запасенной лазерной энергии. Для сопла с  $h^* = 0,2$  мм и  $A/A^* = 50$   $\alpha_{\max} = 0,75$  м<sup>-1</sup> и  $E_{\max} \approx 44$  кВт/(кг/с).

Результаты рассмотренных выше расчетов демонстрируют большие потенциальные возможности газодинамического лазера на обычном жидком углеводородном топливе. Об этом же свидетельствуют и экспериментальные данные о коэффициенте усиления в ГДЛ на продуктах сгорания бензола, бензина и керосина [9, 10]. Настоящая работа продолжает начатые в [10] исследования и посвящена изучению влияния размеров и формы контура сопла на инверсные свойства среды лазера. Особое внимание уделялось аэродинамике сопел и воздействию реальной структуры потока на коэффициент усиления. Проведенные эксперименты дают хорошую основу для проверки применимости одномерных расчетов в широком диапазоне изменения основных параметров, что и было выполнено.

#### Установка и методика измерений

Для проведения экспериментов использовался непрерывный ГДЛ, работавший на продуктах сгорания жидких и газообразных топлив. В качестве окислителя применялся воздух. Схема установки и ее основные элементы описаны в [10, 11]. В дальнейшем были модернизированы отдельные узлы и часть опытов проводилась на новом варианте установки. Изменения коснулись в основном камеры сгорания: диаметр жаровой трубы уменьшен, а относительная длина  $L/D$  увеличена. Стабилизация пламени осуществлялась с помощью рециркуляционной зоны, образованной при внезапном изменении сечения канала. По оси камеры поступал холодный воздух, а в зону обратных токов через мелкие отверстия вдувались подогретая обогащенная топливовоздушная смесь. Такая конструкция камеры сгорания обеспечила устойчивое горение в широком диапазоне избытков воздуха и высокую степень однородности температурного поля без применения выравнивающих решеток.

За камерой сгорания следовал конический переходной участок, охлаждаемый водой. Сменное рабочее сопло из меди зажималось между фланцами рабочей части и переходника и охлаждалось водой. Рабочая часть имела ширину 150 и длину 300 мм. Высота канала немного изменялась по длине, поскольку для компенсации пограничного слоя более длинные стенки устанавливались под углом 1° к оси. В боковых стен-

ках имелись отверстия, куда вставлялись дережавки с окнами из фтористого бария для проведения измерений коэффициентов усиления. К рабочему участку примыкал тракт, состоявший из сверхзвукового диффузора с нерегулируемым горлом, переходной секции, эжектора и дозвукового диффузора. Специальных мер для уменьшения сопротивления выхлопного тракта не предпринималось, поэтому расчетный режим течения в рабочей части при неработающем эжекторе наступал, начиная с  $p_0 = 33$  атм (сопло с  $h^* = 0,7$  мм,  $A/A^* = 28,6$ ). Включение эжектора позволило понизить рабочее давление до 13 атм.

Как и в [9, 10], жидкое топливо сжигалось по схеме с предварительным испарением. Перед поступлением в горелочное устройство оно впрыскивалось в горячий поток. Небольшое количество воздуха, необходимое для этого, подогревалось в накопителе тепла (плотно уложенные в канале медные стержни), разогреваемом до опыта. Температура воздуха за накопителем поддерживалась на уровне  $250-150^\circ\text{C}$ . В процессе проведения эксперимента регистрировались расходы воздуха и топлива, давление в форкамере, распределение давления вдоль рабочей части, температура воздуха за накопителем тепла, распределение температуры продуктов сгорания в сечении переходника в непосредственной близости от сопла и температура рабочей части.

Коэффициент усиления измерялся с помощью стабилизированного по мощности зондирующего лазера. На германиевой пластинке луч лазера расщеплялся. Один из них проходил через рабочую часть, а другой использовался в качестве опорного. Перед опытом сигналы с двух приемников излучения (Ge—Au,  $T = 77$  К) уравнивались, а в процессе эксперимента записывалась их разность, обусловленная прохождением луча через активную зону. По сравнению с измерениями, описанными в [9—11], схема дополнена монохроматором ИКМ-731, с помощью которого до и после опыта регистрировали переход, на котором работал лазер. Значения коэффициентов усиления приводились к их величине на переходе Р20 по формуле

$$\frac{\alpha_{P20}}{\alpha} = \frac{2 \cdot 19 + 1}{2 \cdot j_m + 1} \cdot \frac{\exp[-19 \cdot 20 \cdot \Theta_{001}/T]}{\exp[-j_m(j_m + 1) \Theta_{001}/T]},$$

полученной из обычного выражения для коэффициентов усиления [11] при следующих допущениях:  $\Theta_{100} = \Theta_{001}$ ,  $\Theta_1/T_1 \gg 2(j_m + 1)\Theta_{00}/T$ . Здесь  $\alpha_{P20}$  — коэффициент усиления на переходе Р20, остальные обозначения общеприняты. Поступательная температура потока  $T$  бралась из расчетов течения релаксирующей смеси газов в сопле.

#### Метод расчета

Для проведения расчетного анализа основных характеристик потока при колебательно-неравновесном расширении в сопле составлена программа применительно к смесям, содержащим  $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{HCl}$ . Течение предполагалось стационарным и одномерным. Учет колебательного энергообмена проводился в рамках следующих допущений: колебания, отвечающие каждой моде, являются гармоническими; среди молекул, относящихся к одному типу колебаний, устанавливается больцмановское распределение заселенности уровней с колебательной температурой  $T_i$ ; в связи с резонансом Ферми симметричная и деформационная моды молекулы  $\text{CO}_2$  имеют одинаковые колебательные температуры; все типы колебаний молекулы воды находятся в равновесии с поступательным движением; вращательная и поступательная температуры совпадают; состав смеси не меняется по длине.

Релаксационные уравнения для определения среднего числа квантов, приходящихся на одну молекулу, записывались в соответствии с работой [12]. Учитываемые в расчетах процессы колебательного обмена

Таблица 1

| Процесс                                                                                                                                   | М                    | $Q^{-1}$ и $\tau$ , атм·с                                                 | Лите-<br>ратура |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|---------------------------------------------------------------------------|-----------------|
| $\text{CO}_2(01^{10}) + \text{M} \rightarrow \text{CO}_2(00^{00}) + \text{M}$                                                             | $\text{CO}_2$        | $\lg \tau = 17,42x - 7,85$                                                | [22]            |
|                                                                                                                                           | $\text{N}_2$         | $\lg \tau = 15,55x - 8,06$                                                |                 |
|                                                                                                                                           | $\text{HCl}$         | $-15,5x - 6,12$                                                           |                 |
|                                                                                                                                           | $\text{O}_2$         | $15,55x - 8,06$                                                           | [22]            |
|                                                                                                                                           | $\text{H}_2\text{O}$ | $\tau = 3 \cdot 10^{-9}$                                                  | [23]            |
| $\text{N}_2(1) + \text{M} \rightarrow \text{N}_2 + \text{M}$                                                                              | $\text{CO}_2$        | $\lg \tau = 104x - 11,2$                                                  | [22]            |
|                                                                                                                                           | $\text{N}_2$         | $95,5x - 10,76$                                                           |                 |
|                                                                                                                                           | $\text{HCl}$         | $56,2x - 10,254$                                                          |                 |
|                                                                                                                                           | $\text{H}_2\text{O}$ | $36,8x - 9,812$                                                           |                 |
|                                                                                                                                           | $\text{O}_2$         | $97,8x + 1,3$                                                             | [23]            |
| $\text{HCl}(1) + \text{M} \rightarrow \text{HCl} + \text{M}$                                                                              | $\text{CO}_2$        | $\lg \tau = 27,8x - 8,88$                                                 | [22]            |
|                                                                                                                                           | $\text{N}_2$         | $27,8x - 7,23$                                                            |                 |
|                                                                                                                                           |                      | $\tau = 1,6 \cdot 10^{-6}, T \leq 733;$                                   |                 |
|                                                                                                                                           | $\text{HCl}$         | $\tau = 4,21 \cdot 10^{-7} \exp [64(x - 0,09)], T > 733$                  |                 |
|                                                                                                                                           |                      | $\tau = 3 \cdot 10^{-9}, T < 300$                                         |                 |
| $\text{O}_2(1) + \text{M} \rightarrow \text{O}_2 + \text{M}$                                                                              | $\text{H}_2\text{O}$ | $\lg \tau = -30,4x - 3,96, 300 < T < 1000$                                | [12]            |
|                                                                                                                                           |                      | $\tau = 10^{-7}, T > 1000$                                                |                 |
|                                                                                                                                           | $\text{O}_2$         | $\lg \tau = 27,8x - 7,23$                                                 |                 |
|                                                                                                                                           | $\text{O}_2$         | $\frac{1}{\tau} = \frac{0,123 \cdot \exp(8,5 - 157x)}{T}$                 |                 |
|                                                                                                                                           | $\text{CO}_2$        | $\tau = \frac{1}{600} \cdot \tau_{\text{O}_2}$                            |                 |
| $\text{CO}_2(00^01) + \text{M}(0) \rightarrow \rightarrow \text{CO}_2(00^00) + \text{M}(1)$                                               | $\text{N}_2$         | $\lg Q = 7,42 - 1,65 \cdot 10^{-3} \cdot T + 5,7 \cdot 10^{-7} \cdot T^2$ | [22]            |
|                                                                                                                                           | $\text{HCl}$         | $Q = 1,98 \cdot 10^{10}/T$                                                |                 |
| $\text{CO}_2(00^00) + \text{O}_2(1) \rightarrow \rightarrow \text{CO}_2(020) + \text{O}_2(0)$                                             |                      | $Q = 2,5 \cdot 10^7$                                                      | [12]            |
| $\text{HCl}(1) + \text{N}_2(0) \rightarrow \text{HCl}(0) + \text{N}_2(1)$                                                                 |                      | $Q = 1,14 \cdot 10^7 / \sqrt{T}$                                          | [22]            |
| $\text{M}(1) + \text{O}_2(0) \rightarrow \text{M}(0) + \text{O}_2(1)$                                                                     | $\text{N}_2$         | $Q = \frac{4,4 \cdot 10^{(11 - 48,7 \cdot x)}}{T}$                        | [23]            |
|                                                                                                                                           | $\text{HCl}$         | $\lg \tau = 56,2x - 10,25$                                                |                 |
| $\text{CO}_2(00^01) + \text{M} \rightleftharpoons \begin{cases} \text{CO}_2(11^10) + \text{M} \\ \text{CO}_2(030) + \text{M} \end{cases}$ | $\text{CO}_2$        | $\ln Q = 4,344 + 218,23 \cdot x - 168,77 \cdot x^2 +$                     | [22]            |
|                                                                                                                                           |                      | $+ 3909,3 \cdot x^2$                                                      |                 |
|                                                                                                                                           | $\text{N}_2$         | $\ln Q = -1,657 + 424,03 \cdot x - 3852,7 \cdot x^2 +$                    |                 |
|                                                                                                                                           |                      | $+ 10\,672,2 \cdot x^3$                                                   |                 |
|                                                                                                                                           | $\text{HCl}$         | $Q = 3,4 \cdot 10^6$                                                      |                 |
| $\text{H}_2\text{O}$                                                                                                                      |                      | $\ln Q = 5,62 + 11,2 \cdot x$                                             | [23]            |
|                                                                                                                                           |                      | $Q_{23}^{\text{O}_2} = Q_{23}^{\text{N}_2}$                               |                 |

Примечание.  $x = T^{-1/3}$ .

энергией и скорости соответствующих реакций приведены в табл. 1. Расчет неравновесного течения в сопле начинался с координаты, где температура приблизительно на 1% отличалась от ее значения в критическом сечении. До этой координаты течение считалось равновесным. В результате вычислений в выходном сечении сопла определялись газодинамические параметры, колебательные температуры, а также коэффициент усиления слабого сигнала на переходе Р20 и запасенная колебательная энергия (с учетом неиспользуемой части, обусловленной населенностью нижнего лазерного уровня).

### Результаты и их обсуждение

**Общие замечания.** Условия проведения экспериментов и основные размеры применявшихся сопел приведены в табл. 2. Температура торможения изменялась в пределах  $T_{\text{ф}} = 1000 - 1700$  К, а  $P_{\text{ф}} = 13 - 35$  атм. В качестве топлива использовались бензол, бензин, керосин, смесь бензола с четыреххлористым углеродом и смесь окиси углерода с водородом. Окислителем во всех экспериментах служил воздух.

Исследовано 8 сопел, различавшихся высотой критического сечения ( $h^* = 0,34 \div 0,41$  и  $0,7$  мм), высотой выходного сечения ( $H = 10$  и  $20$  мм), степенью расширения сопла ( $A/A^* = 14,3, 28,6$  и  $50$ ) и начальным углом излома контура ( $\theta_n = 37 \div 42$  и  $25^\circ$ ). До- и трансзвуковой профиль всех сопел был одинаков: клиновидный вход с полууглом в  $60^\circ$  сопрягался радиусом  $0,5$  мм с прямолинейным участком длиной  $\sim 0,2$  мм, за которым следовала угловая точка.

Контур сверхзвуковой части сопел I—V, VIII выполнен по дуге окружности (радиусные сопла), так что на выходе стенки направлены

Таблица 2

| Номер сопла | Размеры сопла |          |                   |          |            |          | Условия опытов                                      |                      |                                                             | Нумерация серий рис. 2 |
|-------------|---------------|----------|-------------------|----------|------------|----------|-----------------------------------------------------|----------------------|-------------------------------------------------------------|------------------------|
|             | $h^*$ , мм    | $H$ , мм | $\theta_n$ , град | $R$ , мм | $L_c$ , мм | $L$ , мм | топливо                                             | $P_{\text{ф}}$ , атм | $\frac{P_{\text{ф}} \cdot h^*}{\text{атм} \cdot \text{мм}}$ |                        |
| I           | 0,7           | 20       | 42                | 37,5     | 25         | 37       | CO+H <sub>2</sub> , C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> , | 16                   | 1,25                                                        | 1                      |
|             |               |          |                   |          |            |          | C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> +CCl <sub>4</sub>     | 21                   | 1,65                                                        | 2                      |
|             |               |          |                   |          |            |          | керосин, бензин                                     | 31                   | 2,4                                                         | 3                      |
| II          | 0,7           | 20       | 25                | 106,5    | 45         | 50       | Керосин                                             | 21                   | 3,1                                                         | 4                      |
|             |               |          |                   |          |            |          |                                                     | 31                   | 4,6                                                         | 5                      |
| III         | 0,38          | 20       | 25                | 106,5    | 45         | 50       | »                                                   | 21                   | 1,8                                                         | 6                      |
|             |               |          |                   |          |            |          |                                                     | 31                   | 2,7                                                         | 7                      |
| IV          | 0,7           | 10       | 25                | 53,2     | 22,5       | 20       | »                                                   | 21                   | 3,1                                                         | 8                      |
|             |               |          |                   |          |            |          |                                                     | 31                   | 4,6                                                         | 9                      |
| V           | 0,35          | 10       | 25                | 53,2     | 22,5       | 20       | »                                                   | 21                   | 1,5                                                         | 10                     |
|             |               |          |                   |          |            |          |                                                     | 31                   | 2,2                                                         | 11                     |
| VI          | 0,7           | 20       | 41,5              | —        | 56         | 56       | Керосин, C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>              | 13                   | 1,03                                                        | 12                     |
|             |               |          |                   |          |            |          |                                                     | 21                   | 1,67                                                        | 13                     |
|             |               |          |                   |          |            |          |                                                     | 35                   | 2,8                                                         | 14                     |
| VII         | 0,7           | 20       | —                 | —        | 56         | 56       | Керосин                                             | 20                   | —                                                           | 15                     |
| VIII        | 0,38          | 10       | 37                | 25       | 15         | 23       | »                                                   | 31                   | 1,6                                                         | 16                     |

Примечание.  $R$  — радиус контура сверхзвуковой части сопла,  $L_c$  — длина сопла,  $L$  — расстояние от горла сопла до точки измерения.

Рис. 1. Эффективность различных топлив; сопло I,  $p_{\text{ф}} = 21$  атм.

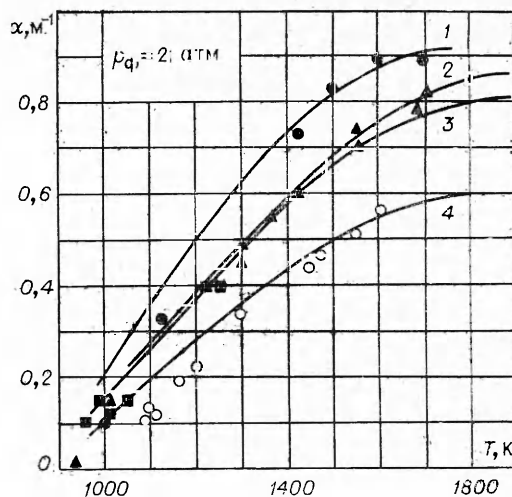
1 —  $\text{CO} + \text{H}_2$ ; 2 —  $\text{C}_6\text{H}_6$ ; 3 —  $\text{C}_6\text{H}_6 + \text{CCl}_4$  (1 : 1 по массе); 4 — керосин. Линии — расчет.

параллельно оси. Такие сопла представляют интерес ввиду их технологичности. Профиль VI взят из численных расчетов (методом характеристик) сопел с изломом контура [13]. Последний наиболее часто применялся в ГДЛ. Однако наличие угловой точки, как показали расчеты [14], может приводить к появлению области торможения в сверхзвуковом потоке, способствующей отрыву пограничного слоя и появлению ударных волн. Существование таких областей может быть обусловлено как самим характером течения идеального газа за угловой точкой, так и реальными свойствами потока, например вязкостью и неравновесным протеканием физико-химических процессов в газе [15]. В расчетах [14] указывалось также, что скругление острой кромки радиусом  $r \sim 0,5 h^*$  приводит к исчезновению области торможения. Принимая во внимание эти соображения, профиль сопла VII был выполнен полностью идентичным соплу VI, но острая кромка скруглена ( $r \sim 0,5$  мм).

**Сравнение эффективности применения различных топлив.** Как видно из табл. 2, в экспериментах с соплом I использовались разнообразные топлива. Результаты этих опытов позволяют судить, насколько эффективны исследованные топлива для создания лазерноактивной среды. На рис. 1 показана зависимость коэффициентов усиления от температуры. Измерения проводились несколько дальше выходного сечения сопла на оси канала (расстояние от горла сопла 37 мм).

Помимо данных для жидких топлив, приведена также зависимость  $\alpha(T_{\text{ф}})$ , полученная ранее в опытах с газообразной смесью  $\text{CO} + \text{H}_2$  [11], причем на рис. 1 нанесены точки, соответствующие оптимальному содержанию  $\text{H}_2\text{O}$  ( $\sim 2\%$ ). Для таких составов измерения дали самые большие значения коэффициентов усиления ( $\alpha_{\text{max}} \sim 0,9 \text{ м}^{-1}$  при  $T_{\text{ф}} = 1700 \text{ К}$ ). Несколько ниже они в случае бензольного топлива:  $\alpha_{\text{max}} = 0,82 \text{ м}^{-1}$  при  $T_{\text{ф}} = 1700 \text{ К}$ . В опытах с керосином также зафиксированы достаточно большие значения коэффициентов усиления. Данные для бензина не нанесены, поскольку они полностью совпадают с показанными на рис. 1, 4 [см. 11]. Это объясняется тем, что состав продуктов сгорания керосина и бензина при равном избытке воздуха практически одинаков.

Для более ясной интерпретации результатов, показанных на рис. 1, в табл. 3 приведены составы продуктов сгорания в исследованном диапазоне температур. Видно, что при низких температурах содержание  $\text{H}_2\text{O}$  и  $\text{CO}_2$  при горении оптимальной смеси  $\text{CO} + \text{H}_2$  и  $\text{C}_6\text{H}_6$  приблизительно одинаково, а при  $T = 1600 \text{ К}$  концентрация  $\text{H}_2\text{O}$  в продуктах сгорания бензола вдвое выше, чем в случае газообразного топлива, но тем не менее оно не далеко от оптимального. В свою очередь, концентрация  $\text{CO}_2$  при горении газообразного топлива при больших  $T$  значительно превышает оптимальное значение. Эти два фактора объясняют, почему и при достаточно высоких температурах различие коэффициентов усиления, полученных в опытах с  $\text{C}_6\text{H}_6$  и  $\text{CO} + \text{H}_2$ , незначительно.





| Топливо                                                  | T=1000 K         |                 |                |                | T=1200 K         |                 |                |                |
|----------------------------------------------------------|------------------|-----------------|----------------|----------------|------------------|-----------------|----------------|----------------|
|                                                          | H <sub>2</sub> O | CO <sub>2</sub> | O <sub>2</sub> | N <sub>2</sub> | H <sub>2</sub> O | CO <sub>2</sub> | O <sub>2</sub> | N <sub>2</sub> |
| Керосин                                                  | 0,04             | 0,045           | 0,15           | 0,765          | 0,05             | 0,055           | 0,13           | 0,765          |
| C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>                            | 0,02             | 0,04            | 0,155          | 0,785          | 0,027            | 0,054           | 0,135          | 0,784          |
| C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> +CCl <sub>4</sub><br>(1:1) | 0,02             | 0,05            | 0,13           | 0,79           | 0,025            | 0,065           | 0,11           | 0,784          |
| CO+H <sub>2</sub>                                        | 0,02             | 0,06            | 0,156          | 0,764          | 0,02             | 0,102           | 0,14           | 0,738          |

Пр и м е ч а н и е. Содержание HCl в продуктах сгорания смеси C<sub>6</sub>H<sub>6</sub> + CCl<sub>4</sub> : 0,01 (T —

Смесь, образующаяся при сжигании керосина, содержит водяных паров почти больше, чем в продуктах горения бензола, а концентрация CO<sub>2</sub> и других компонентов практически та же (см. табл. 3). Более интенсивная релаксация верхнего лазерного уровня CO<sub>2</sub> и уровня  $\nu = 1$  молекул N<sub>2</sub> при столкновении с молекулами H<sub>2</sub>O обуславливает ухудшение инверсных свойств продуктов сгорания керосиновоздушных смесей.

Добавление к бензолу четыреххлористого углерода приводит к появлению в продуктах сгорания, наряду с обычными компонентами (CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>), молекул HCl. Роль галогеноводородов в CO<sub>2</sub>-ГДЛ наиболее полно рассмотрена в работе [16]. В ней, в частности, отмечалось, что, поскольку молекулы галогеноводородов дипольные, их собственная колебательная релаксация происходит быстро. Молекулы галогеноводородов оказывают также большое влияние на скорость релаксации верхнего и нижнего лазерного уровней CO<sub>2</sub>. Расчеты [16] показали, что содержание HCl в смесях CO<sub>2</sub>—N<sub>2</sub>—HCl может быть значительным без заметного ухудшения инверсных свойств среды ГДЛ. Результаты экспериментальных исследований влияния HCl содержатся в [17]. В настоящей работе роль добавки HCl изучалось в ином диапазоне параметров и составов смеси.

Как видно из табл. 3, содержание HCl в продуктах сгорания изменялось от 1 до 3,3%, а в остальном состав смеси был почти таким же, как и в опытах с чистым бензолом. Такое количество примеси хлористого водорода практически не повлияло на ход зависимости  $\alpha(T)$  (см. рис. 1, 2, 3). Полученные результаты находятся в соответствии с расчетами [16], где показано, что в смесях CO<sub>2</sub>—N<sub>2</sub>—H<sub>2</sub>O—HCl наличие 1—3% паров воды не приводит к большому смещению от оптимальных условий даже в том случае, когда концентрация HCl существенно выше, чем это имело место в данных экспериментах.

Определенный интерес представляет сравнение измерений в опытах с керосино- и бензоловоздушными смесями с результатами расчетов для этих же смесей [8] в условиях предварительного подогрева воздуха за счет сжатия в компрессоре. Отметим, что размеры сопла в [8] ( $h^* = 0,2$  мм,  $A/A^* = 50$ ) отличались от использованного в наших экспериментах ( $h^* = 0,7$  мм,  $A/A^* = 28,6$ ). Измеренные коэффициенты усиления для системы с бензоловым топливом оказались несколько выше рассчитанного в [8] при одинаковых параметрах торможения ( $T_\phi = 1600$  К,  $\alpha_{\text{экс}} = 0,82$ ,  $\alpha_{\text{расч}} = 0,68$  м<sup>-1</sup>). Для системы с керосином предварительный подогрев воздуха, приводя к снижению в продуктах сгорания концентрации H<sub>2</sub>O и CO<sub>2</sub>, делает состав смеси ближе к оптимальному. Этим, в частности, объясняется увеличение вычисленных коэффициентов усиления по сравнению с опытными данными ( $\alpha_{\text{экс}} = 0,55$ ,  $\alpha_{\text{расч}} = 0,65$  м<sup>-1</sup> при  $T = 1600$  К) и небольшое отличие расчетных результатов во всем диапазоне параметров торможения для керосино- и бензоловоздушных смесей. Отметим также, что выполненные в настоящей рабо-

Таблица 3

| T=1400 K         |                 |                |                | T=1600 K         |                 |                |                |
|------------------|-----------------|----------------|----------------|------------------|-----------------|----------------|----------------|
| H <sub>2</sub> O | CO <sub>2</sub> | O <sub>2</sub> | N <sub>2</sub> | H <sub>2</sub> O | CO <sub>2</sub> | O <sub>2</sub> | N <sub>2</sub> |
| 0,062            | 0,068           | 0,11           | 0,76           | 0,075            | 0,080           | 0,09           | 0,755          |
| 0,035            | 0,07            | 0,118          | 0,77           | 0,042            | 0,084           | 0,1            | 0,774          |
| 0,03             | 0,083           | 0,088          | 0,774          | 0,035            | 0,1             | 0,066          | 0,766          |
| 0,02             | 0,135           | 0,12           | 0,725          | 0,02             | 0,17            | 0,103          | 0,707          |

= 1000 K), 0,018 (1200 K), 0,025 (1400 K), 0,033 (1600 K).

те расчеты дают максимальные значения коэффициентов усиления для сопла I 0,6 и 0,85 м<sup>-1</sup> (см. рис. 1) по сравнению с  $\alpha_{\max} = 0,78$  и 0,76 м<sup>-1</sup> из расчетов [8] в случае использования керосина и бензола соответственно. Опыты с соплом VI также проводились с двумя топливами (см. табл. 2). Их результаты идентичны показанным на рис. 1.

**Зависимость коэффициентов усиления от параметров торможения.** Влияние температуры и давления для всех исследованных сопел иллюстрирует рис. 2. В табл. 2 дано обозначение точек, соответствующих режимам опытов. Штриховые линии проведены по экспериментальным точкам, сплошные линии — результаты расчетов. Цифрами указано соответствующее давление в форкамере  $p_f$ . Расчет удовлетворительно описывает экспериментальные данные, особенно если учесть, что опыты выполнены в широком диапазоне изменения геометрии сопла (см. табл. 2) и параметров торможения. Как правило, в области низких температур измеренные значения  $\alpha$  меньше расчетных, а при  $T_f = 1300$ —1600 K получено приемлемое согласие. В одной серии с соплом V и в ряде опытов с соплом IV большая часть точек лежит выше расчетной линии. По всей видимости, некоторое несоответствие эксперимента и расчетов объясняется неопределенностью констант скоростей релаксационных процессов, а также точностью измерений. В целом же можно констатировать пригодность одномерных расчетов для вычисления коэффициентов усиления на оси выходного сечения сопла (см. рис. 1, 2) в диапазоне температур, характерных для современных ГДЛ. (Ниже будет обсуждаться вопрос о степени достоверности результатов одномерной методики во всем поле течения в резонаторе.)

Ход зависимостей  $\alpha(T_f)$  отражает влияние температуры торможения и соответствующего ей состава продуктов сгорания. Максимум коэффициентов усиления в исследованном диапазоне параметров находится в диапазоне  $T_{f \max} = 1500$ —1900. Низшее значение  $T_{f \max}$  наблюдается в опытах с соплом IV, наивысшее — с соплом VIII. Увеличение степени расширения сопла и начального угла контура, а также уменьшение высоты критического сечения смещает  $T_{f \max}$  в область больших значений (см. рис. 2).

Во всех экспериментах зафиксировано падение коэффициентов усиления с ростом давления. Контур спектральной линии в условиях данной работы в основном обусловлен соударением, поэтому увеличение  $p_f$  приводит к ускорению релаксации верхнего лазерного уровня CO<sub>2</sub> и уровня  $v = 1$  N<sub>2</sub>. Уменьшение давления сопровождается возрастанием  $T_{f \max}$  и  $\alpha_{\max}$  для данного сопла также увеличивается. Наиболее четко это видно на рис. 2, VI, где приведены результаты для наиболее широкого диапазона  $p_f$ .

Отсюда следует, что оптимальным условиям работы ГДЛ соответствуют более низкие давления. Минимальная величина рабочего давления определяется эффективностью его восстановления в тракте установки и зависит в основном от числа Маха на выходе из сопла. Как



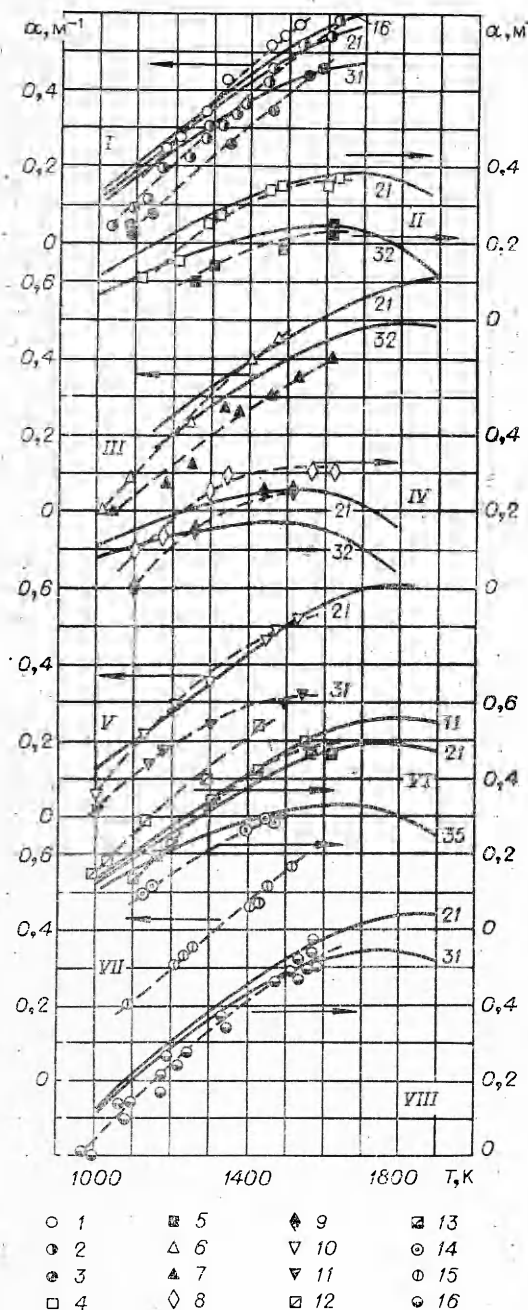


Рис. 2. Зависимость коэффициентов усиления от температуры. Топливо — керосин. I÷VIII — номера сопел (см. табл. 2).

указано в [18], получить коэффициент восстановления полного давления выше, чем в прямом скачке при числе  $M$  рабочей части, чрезвычайно трудно. Это означает, что рабочее давление, например, для сопла с  $A/A^{**} = 28,6$  будет не менее 19 атм.

**Влияние основных размеров сопла на коэффициент усиления.** Результаты, приведенные на рис. 2, позволяют проанализировать роль основных размеров сопла:  $h^*$ ,  $A/A^*$ ,  $\theta_n$ . Для большей наглядности на рис. 3 сопоставлены зависимости  $\alpha(T_f)$  для сопел, различающихся только одним из указанных параметров, в то время как остальные одинаковы или близки между собой.

Уменьшение  $h^*$  и увеличение  $\theta_n$  способствует более быстрому охлаждению смеси, что ведет к уменьшению скорости релаксационных процессов. В результате действие каждого из этих факторов увеличивает коэффициент усиления (см. рис. 3, 1, 2, 5, 6). В то же время изменение степени расширения сопла от 28,6 до 49 не сказалось на величине  $\alpha$  (см. рис. 3, 3, 4). Небольшое отличие данных для сравниваемых сопел вызвано некоторой разницей значений  $h^*$ . Следовательно, при температурах торможения 1600 К (и очевидно, несколько выше — об этом свидетельствует ха-

актер зависимости  $\alpha(T)$  на рис. 3, 3, 4) величина  $A/A^* \approx 30$  вполне достаточна для эффективной работы ГДЛ на продуктах горения топлив типа керосина. Дополнительное расширение, не изменяя инверсных свойств потока, лишь увеличивает потребное давление.

**Обобщение опытных данных.** Коэффициент усиления слабого сигнала зависит от большого числа параметров: температуры и давления торможения, состава смеси, величины  $h^*$ ,  $\theta_n$ ,  $A/A^*$  и формы контура сверхзвуковой части сопла (при больших  $p_f$ , характерных для современных ГДЛ, течение до критического сечения близко к равновесному и профиль дозвуковой части не оказывает существенного влияния на инверсные свойства среды). В случае ГДЛ на горении температура

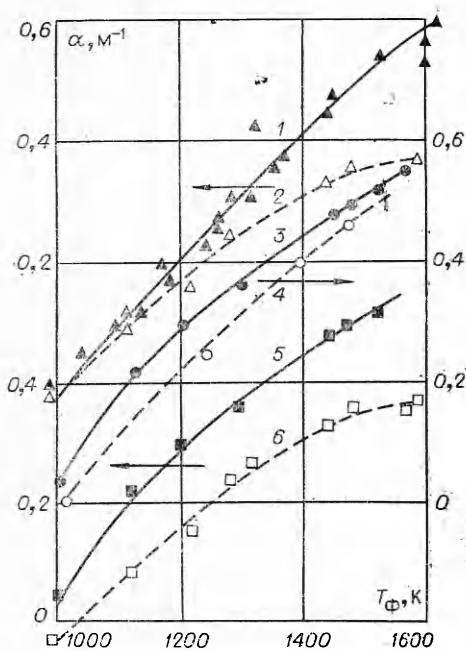


Рис. 3. Влияние  $\theta_n$ ,  $A/A^*$ ,  $h^*$  на коэффициент усиления;  $p_\Phi = 21$  атм.

1 —  $\theta_n = 42^\circ$  (сопло I); 2 —  $\theta_n = 25^\circ$  (сопло II); 3 —  $A/A^* = 28,6^\circ$  (сопло V); 4 —  $A/A^* = 52,5^\circ$  (сопло III); 5 —  $h^* = 0,35$  мм (сопло V); 6 —  $h^* = 0,7$  мм (сопло II).

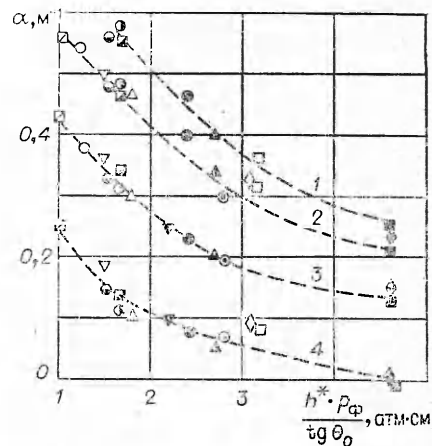


Рис. 4. Обобщение опытных данных (обозначение точек см. на рис. 2).

$T$ , К: 1 — 1600, 2 — 1500, 3 — 1300, 4 — 1100.

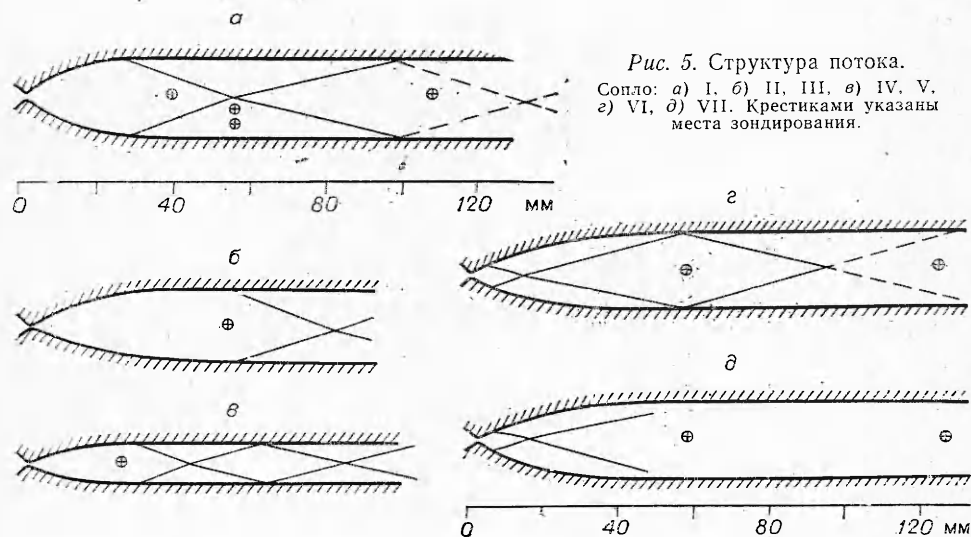
продуктов сгорания однозначно определяет состав смеси (для определенного топлива) и, следовательно, число независимых переменных уменьшается. Тем не менее оно все еще слишком велико, и это обстоятельство делает экспериментальный поиск оптимальных условий работы ГДЛ весьма трудоемким.

В [1] отмечалось подобие течения колебательно релаксирующей смеси данного состава в соплах при одинаковых значениях  $T_\Phi$  и параметра  $\lambda = p_\Phi \cdot l$  и одинаковой зависимости степени расширения потока  $A/A^*$  от продольной координаты  $x/l$ . В случае одномерного движения в плоских клиновидных соплах при  $T_\Phi = \text{const}$  и одинаковом составе коэффициент усиления зависит только от параметров  $\lambda = p_\Phi \cdot h^*/\text{tg } \theta_n$  и  $A/A^*$  (контур спектральной линии предполагается ударным).

Полученные в работе экспериментальные данные позволяют проверить возможность обобщения с помощью указанного параметра. Такая обработка представлена на рис. 4. Напомним, что коэффициенты усиления измерялись на оси канала вблизи выходного сечения. Штриховые линии проведены по точкам, соответствующим постоянной  $T_\Phi$ . Обозначение точек такое же, что и на рис. 2. Видно, что данные, полученные в опытах с соплами различных размеров и формы сверхзвуковой части, хорошо обобщаются. Таким образом, требование одинаковой зависимости  $A/A^*$  от  $x/l$ , которое необходимо для строгого выполнения подобия, не является жестким в области исследованных параметров.

На рис. 4 нанесены точки, соответствующие различным значениям  $A/A^*$ . Для максимальных температур, имевших место в данных опытах, величина  $A/A^* \approx 30$  вполне достаточна для эффективной работы лазера и дальнейшее увеличение  $A/A^*$  не приводит к росту  $\alpha$ . Более того, при относительно низких температурах точки, соответствующие  $A/A^* = 14,3$ , также ложатся на общую линию, что свидетельствует о достаточном охлаждении газа в выходном сечении сопла. Несомненно, при увеличении  $T_\Phi$  следует ожидать расслоения данных по параметру  $A/A^*$ .

Возможность обобщения с помощью параметра  $p_\Phi \cdot h^*/\text{tg } \theta_n$  коэффициентов усиления для сопел с различным характером изменения



$A/A^*(x/l)$ , по всей видимости, связана с быстрым замораживанием колебательной энергии верхнего лазерного уровня вблизи критического сечения в области, где течение с достаточной степенью точности можно считать аналогичным течению в плоском клиновидном сопле. Причем, очевидно, текущее значение угла  $\theta$  здесь не слишком сильно отличается от начального значения  $\theta_n$ .

**Влияние реальной структуры потока на коэффициент усиления.** Как следует из рис. 4, форма контура сверхзвуковой части непосредственно не влияет на результаты измерений на осевой линии вблизи выходного сечения сопла. Однако именно сверхзвуковой профиль формирует течение в резонаторной полости и от степени однородности потока ниже выходного сечения сопла зависит характер изменения коэффициентов усиления в этой области. С целью изучения влияния реальной структуры потока на инверсные свойства среды ГДЛ предварительно проведены подробные аэродинамические измерения, которые затем сопоставлены с закономерностями изменения  $\alpha(x, y)$ . Большинство опытов проведено на холодном воздухе, для чего использовалась специальная рабочая часть со сменными соплами, аналогичными устанавливавшимся в тракте ГДЛ. Часть полученных результатов содержится в [19]. Подробно исследования аэродинамики сопел ГДЛ будут изложены в отдельной статье. Ниже рассмотрены только основные особенности течения.

На рис. 5 показана структура потока в соплах и канале постоянного сечения, полученная на основе теневых фотографий. Картина течения для сопел II и III, а также IV и V соответственно была полностью идентичной. Во всех исследованных соплах наблюдалась более или менее выраженная система скачков уплотнения. В радиусных соплах скачки отходят от профилированных стенок вблизи выходного сечения сопла и формируют в канале ромбовидную структуру. С уменьшением  $\theta_n$  их интенсивность ослабевает. Скачки уплотнения возникают также и в соплах, профилированных методом характеристик (рис. 5, г, д), но здесь они отходят от стенок вблизи критического сечения и первый раз пересекаются на оси на расстоянии  $x \approx 13$  мм. В сопле со скругленной кромкой скачки после пересечения ослабевают и почти не видны на теневой фотографии.

Из результатов измерения давления на стенках и в потоке отметим, что на выходе из сопла VII и несколько ниже по потоку профили давления практически однородны, в опытах с соплом VI неоднородность не очень велика. Скачки уплотнения в сопле I оказывают наиболее

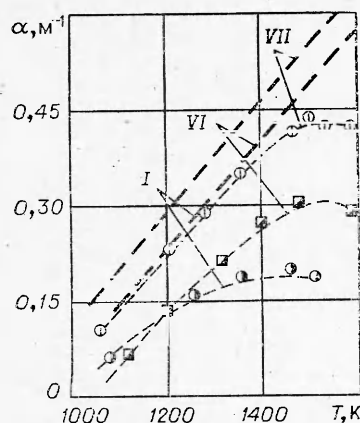


Рис. 6. Изменение коэффициентов усиления по длине канала; кривые —  $l=0$ , точки —  $l=75$  мм,  $p_{\text{ф}}=21$  атм.

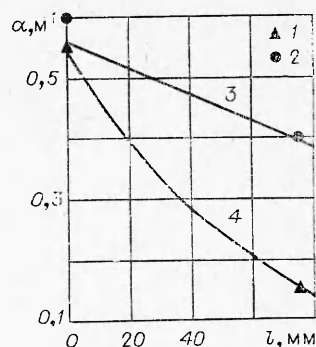


Рис. 7. Сопоставление эксперимента (точки) с результатами одномерного и двумерного расчетов (кривые);  $T_{\text{ф}}=1550$  К,  $p_{\text{ф}}=21$  атм. 1 — сопло I; 2 — сопло VII; 3 — одномерный расчет; 4 — двумерный расчет (сопло I).

сильное воздействие на поток. Во всех случаях число Маха, определенное по показаниям насадков полного и статического давлений, оказалось ниже расчетных, вычисленных по величине  $A/A^*$ . Так, на оси канала в выходном сечении сопла I  $M \approx 4,2$ , а VI и VII —  $M \approx 4,6$ , тогда как расчетное значение числа Маха  $M_p = 5,17$ .

Для сопел I, VI, VII, различающихся только контуром сверхзвуковой части ( $h^*$  и  $A/A^*$  одинаковы — см. табл. 2), измерены коэффициенты усиления на оси канала вблизи выходного сечения ( $l=0$ ) и на расстоянии  $l=75$  мм. Положение мест зондирования показано на рис. 5. Зависимости  $\alpha(T_{\text{ф}})$  в этих опытах приведены на рис. 6. Чтобы не загромождать график, точки для сечения  $l=0$  не нанесены. Значения коэффициентов усиления в опытах с соплами I и VI в этом сечении практически совпали. В сечении  $l=75$  мм зависимости  $\alpha(T_{\text{ф}})$  значительно различаются. В экспериментах с соплом VII затухание коэффициентов усиления по длине слабое, а в радиальном сопле — наиболее сильное. Как отмечалось выше, в этом сопле скачки уплотнения оказывают сильное воздействие на параметры потока. Характерно, что в сечении  $l=75$  мм максимальные значения  $\alpha$  достигаются при меньших температурах, чем в сечении  $l=0$ , причем низшее значение  $T_{\text{max}}$  наблюдается для сопла I. Скачки уплотнения вызывают повышение температуры потока, в результате чего сильнее заселяется нижний и быстрее деактивируется верхний лазерный уровень и уровень  $v=1$  азота.

В связи с результатами, показанными на рис. 6, укажем на два обстоятельства. Ранее в работах [8, 20] также получены теневые фотографии течения в канале за профилированными соплами минимальной длины. Из них следовало, что в потоке имеются ударные волны. Однако соответствующих аэродинамических измерений проведено не было и степень влияния скачковой структуры на полученные результаты оставалась невыясненной. Второе замечание связано с ролью скругления острой кромки. В работе [21] путем численного расчета в одномерной постановке показано, что подобное скругление приводит к небольшому уменьшению коэффициентов усиления на выходе из сопла. (Там же отмечалась большая технологичность таких сопел.) В настоящем исследовании скругление кромки привело к небольшому росту значений  $\alpha$  в выходном сечении. Очевидно, это связано с изменением характера течения вблизи горла, не учитываемом в одномерной постановке.

Возможность использования одномерных и двумерных расчетов для определения коэффициентов усиления в различных условиях иллюстри-

рует рис. 7. Экспериментальные данные для сопел I и VII близки в сечении  $l=0$  и значительно различаются в сечении  $l=75$  мм. Одномерный расчет хорошо описывает изменение  $\alpha(l)$  в случае сопла VII, где, как отмечалось, параметры потока весьма однородны. Естественно, что в рамках одномерной модели невозможно учесть влияние скачковой структуры на инверсные свойства потока, и различие одномерного расчета от эксперимента для сопла I в сечении  $l=75$  мм очень велико. В то же время двумерный расчет [19], выделяющий в потоке ударные волны, хорошо учитывает реальную структуру потока и правильно отражает ход зависимости  $\alpha(l)$  для сопла I, где интенсивность скачков уплотнения наиболее высока.

В заключение кратко сформулируем основные результаты работы.

Теоретически и экспериментально изучена зависимость коэффициентов усиления от большинства параметров, определяющих работу ГДЛ. Исследовано 5 топлив и 8 сопел различной геометрии. Опыты проведены в диапазоне температур 1000—1700 К при давлении 13—35 атм.

Показана перспективность использования обычных жидких углеводородных топлив в мощных ГДЛ непрерывного действия.

Обсуждено влияние отдельных факторов на коэффициент усиления и показана возможность обобщения опытных данных с помощью параметра  $ph^*/\text{tg } \theta_n$ .

Подробно изучена аэродинамика применявшихся сопел и получены данные о влиянии реальной структуры потока на инверсные свойства среды. Отмечено увеличение коэффициентов усиления при скруглении острой кромки сопла. При интерпретации результатов измерения коэффициентов усиления в газодинамических лазерах необходим более полный учет информации о реальной аэродинамике сопел.

Проведенное в широком диапазоне параметров сравнение одномерных расчетов с экспериментом показало, что одномерная методика удовлетворительно описывает опытные данные на оси выходного сечения сопла. Двумерный расчет дает соответствующую опытам структуру потока и верно учитывает ее влияние на коэффициент усиления.

Поступила в редакцию  
7/VI 1979

#### ЛИТЕРАТУРА

1. С. А. Лосев. Газодинамические лазеры. М., «Наука», 1977.
2. E. T. Gerry. IEEE Spectrum, 1970, 7, p. 51; AIAA — Paper, No 71—23.
3. J. D. Anderson. Acta Astronautica, 1975, 2, 11/12, 911.
4. R. C. Saunders III, L. S. Otten III.—In: Gasdynamic and Chemical Lasers. Proceeding of the International Symposium, 11—15 October, Köln, DFLR — Press, Köln — Porz, Germany.
5. B. G. Pally, C. T. Zovko. AIAA Paper, No 73—1233.
6. Брун, Милевский и др. РТК, 1976, 14, 3.
7. M. J. Brunnner, R. G. Dunn. J. Aircraft, 1975, 12, 12.
8. Р. Дж. Хилл, Н. Т. Джуэлл и др. РТК, 1978, 12, 3.
9. М. Г. Кталхерман, В. М. Мальков и др. Квантовая электроника, 1977, 4, 1.
10. М. Г. Кталхерман, В. М. Мальков и др. ФГВ, 1977, 13, 6.
11. М. Г. Кталхерман, В. М. Мальков и др. ФГВ, 1976, 12, 4.
12. А. С. Бирюков. Тр. ФИАН, т. 83. М., «Наука», 1975.
13. В. П. Верховский. Тр. ЦАГИ, вып. 1860, 1975.
14. У. Г. Пирумов.—В сб.: Некоторые применения метода сеток в газовой динамике. Вып. 6, Изд-во МГУ, 1974.
15. В. Ф. Колмогоров. Изв. АН СССР, МЖГ, 1974, 2.
16. Ю. А. Кулагин. Тр. ФИАН, т. 107. М., «Наука», 1979.

17. Н. Я. Васи́лик, В. М. Шмелев, А. Д. Марголин. Квантовая электроника, 1976, 3, 10.
18. Г. И. Петров.— В сб.: Газодинамические лазеры и лазерная фотохимия. М., Изд-во МГУ, 1978.
19. М. Г. Ктальхерман, В. А. Левин и др. ФГВ, 1979, 14, 1.
20. R. A. Meinzer. AIAA Paper, No 71—25.
21. J. D. Anderson. AIAA Paper, No 72—143.
22. В. А. Левин, Ю. В. Туник. Отчет НИИ механики МГУ, № 1805.
23. R. L. Taylor, S. Bitterman. Rev. Modern Phys., 1969, 41, 1.

## СПЕКТРЫ РАЗРЕЖЕННЫХ ПЛАМЕН УГЛЕВОДОРОДОВ С МОЛЕКУЛЯРНЫМ И АТОМАРНЫМ ФТОРОМ

*Н. Г. Федотов, В. А. Надточенко, О. М. Саркисов, В. И. Веденеев  
(Москва)*

Исследования [1] показали, что свечение разреженных пламен фтора с метаном обусловлено в основном излучением электронно-возбужденных бирадикалов СНF. Квантовый выход этого излучения определен в [2] как отношение числа излученных фотонов к числу прореагировавших молекул метана, и в условиях значительного избытка фтора он составляет  $10^{-3}$ — $10^{-4}$ . Примесь излучения частиц  $C_2$  и  $CH$ , обуславливающих свечение пламен фтора с метаном и другими углеводородами при обычных условиях, в разреженных пламенах при давлении около 1 торр не достигает 1%.

Наблюдение полос СНF в условиях работы [1], близких к изотермическим, указывает на химическую природу их возбуждения. С другой стороны, результаты кинетических исследований реакций фторирования метана и его фторпроизводных [3, 4] показывают, что главной и наиболее интересной особенностью механизма этого класса реакций является возможность энергетического разветвления цепей. Это разветвление — прямое следствие исключительно высокой экзотермики реакций фторирования, оно может осуществляться либо за счет распада химически активированных молекул, либо за счет их реакций с исходными реагентами. Анализ возможных путей образования бирадикалов СНF с энергией электронно-колебательного возбуждения до 65 ккал/моль позволяет предположить, что появление таких частиц прямо или косвенно связано с процессами распада молекул, химически активированных в ходе фторирования, т. е. с процессами разветвления цепей. В данной работе проводились новые спектральные и кинетические исследования хемилюминесценции бирадикалов СНF, условий ее возникновения и связи с механизмом фторирования метана и его фторпроизводных.

Изучение кинетики проводилось с одновременной регистрацией скорости тепловыделения в системе, пропорциональной в условиях опытов скорости реакции, и интенсивности свечения электронно-возбужденных радикалов СНF. Методика измерений в системе  $F_2 + CH_4$ , исследованной в статических условиях, подобна примененной в [3] при изучении механизма фторирования метана при давлениях около 1 торр. Для системы  $F_2 + CH_3F$  в том же диапазоне давлений применена струевая методика, что обусловлено относительно более высокой скоростью превращения реагентов в этом случае. Реактором служила кварцевая трубка длиной около 1 м и диаметром 8 мм. Скорость тепловыделения измерялась перемещением спая нихром-константановой термопары внутри тонкостенного капилляра диаметром 0,5 мм, натянутого по оси трубки. Интенсивность свечения СНF измерялась фотографическим методом. Для этого применялись изоортохроматические фотопленки, чувствительные в