

УДК 621.375.826

## ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СВЕРХЗВУКОВОГО ХИМИЧЕСКОГО КИСЛОРОД-ЙОДНОГО ЛАЗЕРА С РАЗЛИЧНЫМИ ВАРИАНТАМИ СМЕШЕНИЯ ПОТОКОВ

Ю. Н. Дерюгин, Б. А. Выскубенко, Д. К. Зеленский, С. П. Ильин,  
Ю. В. Колобянин, Е. А. Кудряшов  
(РФЯЦ-ВНИИЭФ)

Приведены результаты численного исследования энергетических характеристик сверхзвукового химического кислород-йодного лазера со смесевыми устройствами различного типа. Для каждого типа смесового устройства определены оптимальные условия, при которых реализуются максимальные энергетические характеристики лазера.

*Ключевые слова:* химический кислород-йодный лазер, математическая модель, расчетная методика, характеристики генерации излучения, химическая эффективность.

### Введение

Одно из направлений в создании технологических лазеров непрерывного действия представляют химические кислород-йодные лазеры (ХКИЛ) со сверхзвуковой прокачкой активной среды через резонатор [1]. Конструктивно ХКИЛ представляет собой генератор синглетного кислорода (СК), связанный со сверхзвуковым резонатором переходным каналом. В лазерах такого типа активная среда образуется в результате смешения энергонесущего газа, содержащего СК, с газом, содержащим молекулы йода. Оптимизация конструкций устройства для смешения потоков, обеспечивающая минимальные потери запасенной энергии, является одной из важных задач при разработке ХКИЛ.

В настоящей работе для исследования структуры неравновесных потоков в смесевых устройствах ХКИЛ и определения энергетических характеристик лазеров создана математическая модель и *трехмерная* расчетная методика. Математическая модель включает в себя основные кинетические процессы в активной среде ХКИЛ и процессы генерации лазерного излучения как в устойчивом, так и неустойчивом резонаторе. *Трехмерная* расчетная методика основана на решении как полных, так и параболизированных уравнений Навье—Стокса и позволяет описывать неравновесные течения до- и сверхзвуковых потоков (в том числе в области резонатора), смешение сверхзвуковых потоков и определять энергетические характеристики лазера.

Целью настоящей работы являются численное исследование энергетических характеристик сверхзвукового ХКИЛ для различных вариантов смесевых устройств в режимах функционирования, приближенных к эксперименту, и выработка рекомендаций для получения максимальных выходных характеристик лазера.

### Математическая модель

Система уравнений, используемая для численного моделирования течений в газодинамическом тракте ХКИЛ, может быть записана в виде [2]

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0;$$

$$\begin{aligned}\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i u_j}{\partial x_j} &= -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j}; \\ \frac{\partial \rho E}{\partial t} + \frac{\partial (\rho E + p) u_j}{\partial x_j} &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \chi \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \sum_{n=1}^N h_n \frac{\mu}{Sc} \frac{\partial c_n}{\partial x_j} \right) + \frac{\partial \tau_{ij} u_i}{\partial x_j}; \\ \frac{\partial \rho c_n}{\partial t} + \frac{\partial \rho c_n u_j}{\partial x_j} &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{\mu}{Sc} \frac{\partial c_n}{\partial x_j} \right) + \rho \omega_n; \quad n = 1, 2, \dots, N.\end{aligned}$$

Здесь  $\rho$  — плотность;  $u_i$  —  $i$ -я компонента вектора скорости;  $p$  — давление;  $\tau_{ij}$  — компонента тензора вязких напряжений;  $E$  — полная энергия;  $T$  — температура;  $h$  — удельная энтальпия;  $c_n$  — весовая концентрация  $n$ -го компонента смеси газов;  $\chi$  — коэффициент теплопроводности;  $\mu$  — коэффициент динамической вязкости. Член  $\omega_n$  описывает изменения концентрации  $n$ -го компонента за счет химических реакций в смеси газов, состоящей из следующих компонентов:  $O_2(X^3 \Sigma_g)$ ,  $O_2(a^1 \Delta_g)$ ,  $O_2(b^1 \Sigma_g)$ ,  $I_2$ ,  $I_2(20 \leq v \leq 40)$ ,  $I(^2P_{3/2})$ ,  $I(^2P_{1/2})$ ,  $Cl$ ,  $Cl_2$ ,  $ICl$ ,  $H_2O$ ,  $N_2$ ,  $He$ .

Отметим, что в настоящей работе используется модель кинетики процессов в активной среде ХКИЛ без учета влияния электронно-возбужденного молекулярного йода. Модель основана на результатах работы [3].

Система уравнений замыкается термическим и калорическим уравнениями состояния

$$T = \frac{mp}{R\rho}; \quad h = \sum_{n=1}^N C_{P_n} c_n (T - T_0) + \Delta h_n c_n,$$

выражениями для компонент тензора вязких напряжений

$$\tau_{ij} = \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) - \frac{2}{3} \rho k_t \delta_{ij}$$

и зависимостями для ламинарной и турбулентной вязкостей. Коэффициент теплопроводности и ламинарная вязкость определяются по формуле Саттерленда [2]. Для определения турбулентной вязкости используется двухпараметрическая дифференциальная модель, описанная в работах Потанкара и Сполдинга (см., например, [4]) и основанная на дифференциальных соотношениях для турбулентной кинетической энергии  $k_t$  и скорости диссипации турбулентной энергии  $\varepsilon_t$ :

$$\begin{aligned}\frac{\partial \rho k_t}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_j k_t}{\partial x_j} &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu_t + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k_t}{\partial x_j} \right] + P_t - \rho \varepsilon_t; \\ \frac{\partial \rho \varepsilon_t}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_j \varepsilon_t}{\partial x_j} &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu_t + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon_t}{\partial x_j} \right] + C_1 \frac{\varepsilon_t}{k_t} P_t - C_2 \frac{\rho \varepsilon_t^2}{k_t} - C_3 \rho \varepsilon_t \frac{\partial u_j}{\partial x_j},\end{aligned}$$

где

$$P_t = \mu_t \left[ 2 \left( \frac{\partial u_j}{\partial x_j} \right)^2 + \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)^2 - \frac{2}{3} \left( \frac{\partial u_j}{\partial x_j} \right)^2 \right] - \frac{2}{3} \rho k_t \left( \frac{\partial u_j}{\partial x_j} \right).$$

Эффективная турбулентная вязкость в данной модели определяется согласно выражению  $\mu_t = \rho C_\mu k_t^2 / \varepsilon_t$ , а универсальные константы имеют следующие значения:  $C_\mu = 0,09$ ;  $\sigma_k = 1$ ;  $\sigma_\varepsilon = 1,22$ ;  $C_1 = 1,44$ ;  $C_2 = 1,92$ ;  $C_3 = 0,33$ .

Для расчета мощности генерации ХКИЛ применяется модель, в которой форма распределения интенсивности по потоку является заданной (например из эксперимента), а амплитуда подбирается, как и в модели постоянной интенсивности (см., например, [5]), исходя из соблюдения условия стационарной генерации. Пороговое условие с учетом непостоянства кинетических параметров вдоль оси резонатора записывается в виде

$$\dot{P}(A) = \int_S J(x) \bar{k} \frac{r_1 r_2 \bar{k}}{(r_1 e^{\bar{k}L} + 1)(e^{\bar{k}L} - 1)} dS = 0,$$

где  $S$  — площадь зеркала;  $\bar{k}$  — коэффициент усиления;  $J$  — интенсивность;  $r_1, r_2$  — коэффициенты отражения зеркал;  $L$  — длина оптической оси резонатора. Интенсивность излучения  $J(x)$  задается в форме  $J = AJ_0(x)$ , где  $J_0(x)$  — заданная функция распределения интенсивности,  $A$  — амплитуда.

### Метод решения

Типичная схема ХКИЛ приведена на рис. 1. В генераторе СК формируется *энергонесущий* газовый поток, содержащий СК, который по каналу подается в смесевое устройство. В смесевом устройстве осуществляется инжекция в энергонесущий поток паров молекулярного йода с буферным газом-носителем (например, гелием или азотом). Инжекция осуществляется либо со стенок сопловых решеток, либо с помощью центрального тела с трубчатым инжектором. В результате перемешивания энергонесущего и рабочего потоков образуется активная среда, которая поступает в лазерный резонатор, где создаются условия самовозбуждения оптического квантового генератора.

Трехмерные неравновесные течения во всем тракте ХКИЛ определяются в результате последовательного решения ряда задач [5–7]. В каждой из задач находятся параметры поля течения в одной из областей газодинамического тракта. Полученное решение затем может использоваться для постановки начальных данных следующей задачи. Разбиение расчетной геометрии на области и последовательность решения задач осуществлялись исходя из рассматриваемой конструкции смесового устройства лазера, характера течения и применяемой для описания течения системы уравнений.

Первой задачей является определение стационарных до- и трансзвуковых течений невязкого многокомпонентного газа в сопле Лавала с центральным телом. Такие течения описываются системой уравнений смешанного типа: эллиптического типа — в дозвуковой области течения, параболического — на звуковой линии и гиперболического — в сверхзвуковой области течения. Один из методов решения систем смешанного типа состоит в переходе к нестационарным уравнениям и применении метода установления по времени. Численно нестационарные уравнения Эйлера с учетом кинетики химических реакций интегрируются на эйлеровой сетке конечно-разностным методом с использованием расщепления по физическим процессам. Счетный шаг расщепляется на два этапа. На первом этапе решаются уравнения Эйлера методом Годунова [8]. На этом этапе кинетика считается "замо-

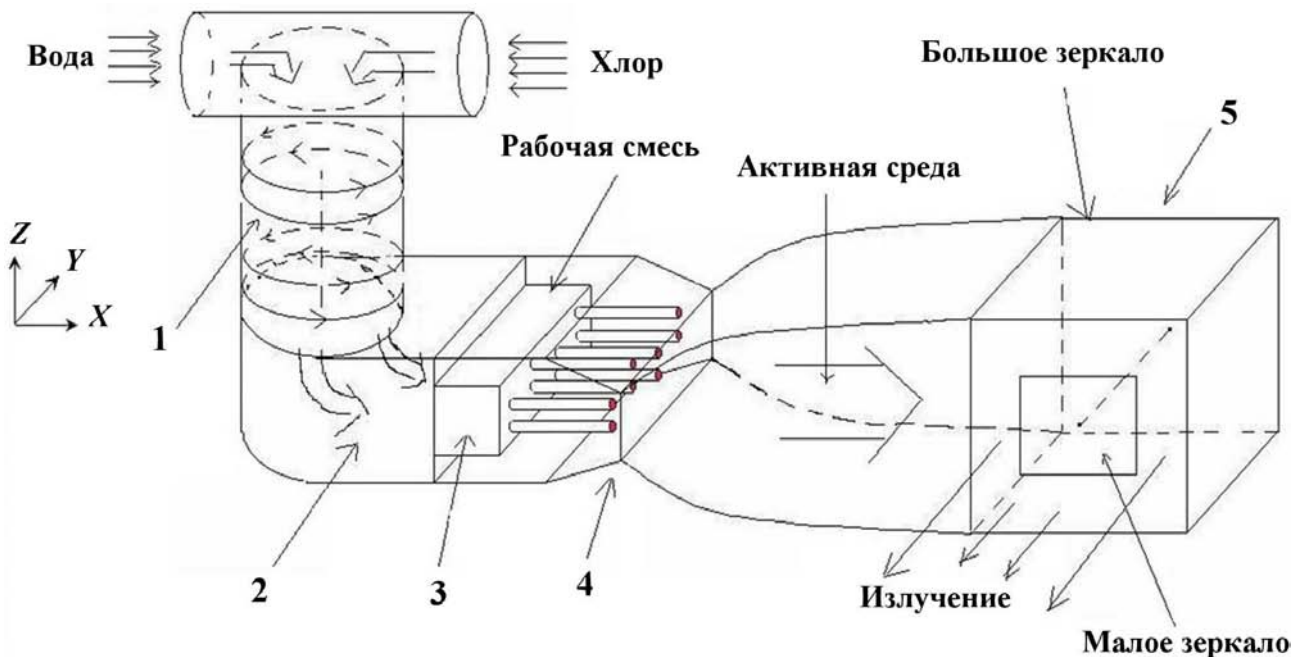


Рис. 1. Схема ХКИЛ: 1 — генератор СК; 2 — дозвуковой канал; 3 — смесевое устройство; 4 — сопло для формирования сверхзвукового потока; 5 — резонатор

роженной". Параметры на гранях ячеек определяются из решения задачи о распаде произвольного разрыва. Для ее решения используется подход, описанный в работе [9]. На втором этапе в каждой точке разностной сетки определяется изменение массовых концентраций за счет химических реакций. Уравнения химической кинетики интегрируются с использованием неявной разностной схемы с весами. Выход на стационарное решение определяется по изменению параметров потока в критическом сечении сопла. Считается, что сходимость в решении достигнута, если относительные изменения расхода газа и параметров потока не превышают заданной точности (обычно полагается  $\varepsilon_0 = 10^{-3}$ ).

Вторая задача — расчет перемешивания потоков. Течения здесь описываются на основе полных либо параболизированных уравнений Навье—Стокса. Алгоритм расчета вязких течений во многом аналогичен алгоритму расчета невязких течений. Конвективные потоки здесь также определяются в результате решения задачи о распаде разрыва. Компоненты тензора вязких напряжений и вязкие потоки аппроксимируются по параметрам с нижнего слоя с использованием центральных разностей. Основное отличие состоит в том, что расчет ведется на подвижной сетке, которая подстраивается под линии тока. При расчете течений на основе полных уравнений новое положение узлов сетки в ортогональных к оси сопла направлениях  $y$  и  $z$  определяется на каждом шаге по формулам

$$y_j^{n+1} = y_j^n + \tau \left( \left( \frac{v}{u} \right)_j^n - \left( \frac{\Delta y}{\Delta x} \right)_j^n \right); \quad z_j^{n+1} = z_j^n + \tau \left( \left( \frac{w}{u} \right)_j^n - \left( \frac{\Delta z}{\Delta x} \right)_j^n \right).$$

При расчете вязких течений маршевым методом на основе параболизированных уравнений Навье—Стокса боковые грани ячеек совмещаются с контактным разрывом. Параметры на контактном разрыве определяются в результате решения задачи о распаде разрыва при взаимодействии сверхзвуковых потоков [8]. Граничные условия для энергонесущего потока берутся из расчета до- и трансзвукового течений. Параметры инжектируемой смеси на срезе трубок инжектора соответствуют числу Маха  $M = 1$ .

Следующей задачей является определение энергетических характеристик лазерной установки из совместного решения уравнений стационарной генерации (модель постоянного коэффициента усиления, модель постоянной интенсивности, модель неустойчивого резонатора) и параболизированных уравнений Навье—Стокса.

Значение интенсивности находится итерациями (методом стрельбы) из условия стационарной генерации. Последовательность вычислений на каждой итерации состоит в следующем. Задаются некоторая форма распределения интенсивности (например из эксперимента) в зависимости от маршевой координаты и ее амплитуда. Затем рассчитывается течение смеси газов в области резонатора. По найденному полю течения вычисляется значение для порогового условия, отвечающее заданной интенсивности. Этим завершается один цикл итерации. Если пороговое условие не выполняется, то предсказывается новое значение амплитуды и делается следующая итерация.

Значение амплитуды в процессе итераций определяется по следующему алгоритму. На первой итерации рассчитывается течение в неработающем резонаторе. Если при этом усиление сигнала будет превышать потери, что означает возможность стационарной генерации, амплитуда интенсивности на второй итерации задается из условия, что вся запасенная энергия в СК переходит полностью в излучение. При таком значении амплитуды решение оказывается заключенным в «вилку». На последующих итерациях значение амплитуды определяется линейной или квадратичной интерполяцией.

## Результаты расчетов

С использованием расчетных методик были проведены исследования процесса образования активной среды в сверхзвуковом ХКИЛ с различными конструкциями смесевых устройств.

**Трехрядный трубчатый инжектор.** Поперечный разрез смесевого устройства данного типа приведен на рис. 2. Контур сверхзвуковой части сопла рассчитан методом характеристик. Инжекция рабочего газа производится через трубчатый инжектор. Трубки расположены в шахматном

порядке в три ряда. Внешний диаметр трубок 0,07 см, внутренний диаметр 0,05 см. Инжекция йода с газом-носителем (азотом) осуществляется в области сверхзвукового потока на расстоянии 0,2 см от критического сечения сопла. На срезе трубки течение инжектируемой струи соответствует числу Маха  $M = 1$ .

Расчеты перемешивания потоков были выполнены для одного периодического элемента расположения трубок инжектора. На рис. 3 представлен элементарный фрагмент расчетной схемы в плоскости инъекции рабочего потока.

В первых расчетах численно исследовалась зависимость энергетических характеристик от состава рабочего газа. В этих расчетах две инжекционные трубки располагались на расстоянии  $\Delta L = \pm 0,1$  см по вертикали от горизонтальной плоскости симметрии элементарного фрагмента (см. рис. 3). Длина оптической оси резонатора 60 см; коэффициент отражения выходного зеркала  $r_1 = 0,9$ ; коэффициент поглощения выходного зеркала  $\delta_{\text{вых}} = 0,002$ ; коэффициент отражения глухого зеркала  $r_2 = 0,998$ . Резонатор расположен на расстоянии 4,2 см от критического сечения. Размер зеркал  $10 \times 10$  см. Молярное содержание йода в газе-носителе варьировалось в диапазоне от 0,005 до 0,2. Отношение расходов рабочего и энергонесущего потоков  $S_{\text{раб}}/S_{\text{эн}}$  изменялось в диапазоне  $0,145 \div 0,251$ .

Результаты расчетов энергетических характеристик приведены в табл. 1. Отметим, что в этой и последующих таблицах приводятся лишь те значения молярного содержания йода, при которых реализуется генерация излучения (при малом содержании может не достигаться порог генерации, а при большом возможно *запирание* потока из-за нагрева). Как видно из представленных результатов, максимальные значения удельного энергосъема  $E_{\text{ген}}$ , мощности излучения  $P$  (приведенной мощности  $W$ ) и химической эффективности  $\chi$  реализуются для инжектируемой струи, содержащей в буферном газе 1,5% молекулярного йода. Для этого состава  $P = 70$  кВт,  $\tilde{E}_{\text{ген}} = 172$  Дж/г и  $\chi \approx 21\%$ .

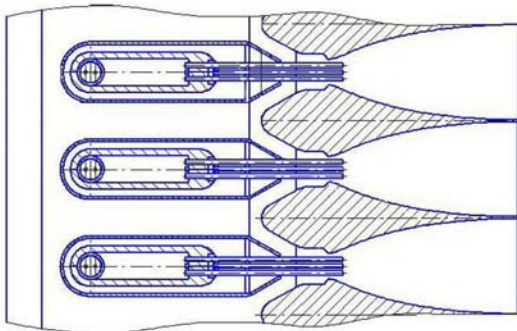


Рис. 2. Схема трехрядного трубчатого инжектора

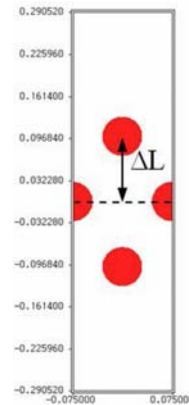


Рис. 3. Элементарный фрагмент расчетной схемы в плоскости инъекции рабочего газа

Таблица 1

Зависимость энергетических характеристик лазера от содержания йода  $\alpha_{I_2}$  в инжектируемом газе для трехрядного трубчатого инжектора

$\alpha_{I_2}$	$P$ , кВт	$W$ , Вт/см <sup>2</sup>	$E_{\text{ген}}$ , Дж/г	$\chi$
0,01	65	108,3	161	0,194
0,015	70	116,7	172	0,209
0,02	68,3	113,8	168,4	0,204
0,025	65,9	109,8	162,1	0,197
0,03	62	103,3	152,2	0,185
0,04	50,4	84	123,1	0,150
0,05	38,6	64,3	93,7	0,115

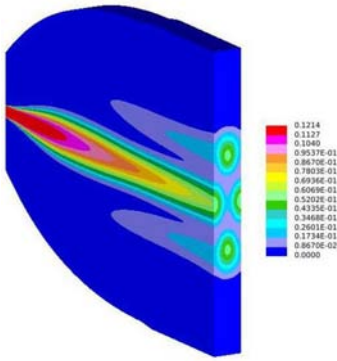


Иллюстрация перемешивания энергонесущего и рабочего потоков для состава рабочей смеси  $0,015 I_2 + 0,985 N_2$  приводится на рис. 4 (см. также цветную вкладку), где показаны изоповерхности концентрации молекулярного йода. Из полученных результатов следует, что на входе в резонатор имеются значительные градиенты в распределениях концентраций молекулярного йода и СК. Около 30 % СК не участвует в образовании активной среды. При малом содержании йода ( $\alpha_{I_2} < 0,005$ ) не достигается условие стационарной генерации при заданных характеристиках резонатора. При большом содержании йода ( $\alpha_{I_2} > 0,05$ ) в инжекционных струях за счет повышенной релаксации СК происходит нагрев потока и образование локальных дозвуковых зон, что, в конечном счете, приводит к запариванию потока.

Для инжектируемого потока, имеющего молярный состав  $0,015 I_2 + 0,985 N_2$ , была исследована зависимость энергетических характеристик от места инъекции рабочего газа. Расчеты проведены для различных положений инжекционных трубок  $\Delta L$  относительно

Рис. 4. Изоповерхности концентрации молекулярного йода при использовании трехрядного трубчатого инжектора

горизонтальной плоскости симметрии (см. рис. 3). Результаты представлены в табл. 2, откуда видно, что расположение инжекционных трубок существенно влияет на степень перемешивания энергонесущего и рабочего потоков, что, в свою очередь, определяет энергетические характеристики. При шахматном расположении инжекционных трубок для данной конструкции смесового устройства существует оптимальное расположение, соответствующее  $\Delta L = 0,2$  см, при котором струйки более равномерно распределены по площади потока. В этом случае увеличивается объем энергонесущего газа, участвующего в перемешивании, и соответственно повышаются энергетические характеристики лазера. При оптимальном расположении трубок инжектора химическая эффективность достигает  $\approx 35\%$ , а удельный энергосъем  $\approx 276$  Дж/г. Для иллюстрации на рис. 5 (см. также цветную вкладку) показаны распределения концентрации СК в поперечном сечении расчетного элемента на входе в резонатор для различных положений инжекционных трубок.

Таблица 2

**Зависимость энергетических характеристик лазера от положения инжектируемых струй в трехрядном трубчатом инжекторе**

$\Delta L$ , см	$P$ , кВт	$W$ , Вт/см <sup>2</sup>	$E_{ген}$ , Дж/г	$\chi$
0,05	29,2	48,7	83,3	0,103
0,1	70	116,7	172	0,209
0,15	90,8	151,3	255,1	0,320
0,2	98,9	164,8	275,4	0,349

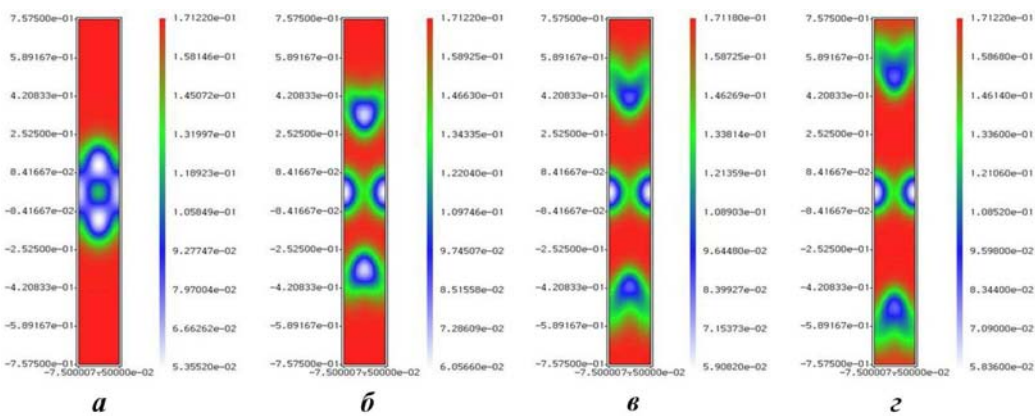


Рис. 5. Распределения концентрации СК на входе в резонатор в случае трехрядного трубчатого инжектора: а –  $\Delta L = 0,05$  см; б –  $\Delta L = 0,1$  см; в –  $\Delta L = 0,15$  см; з –  $\Delta L = 0,2$  см

**Однорядный трубчатый инжектор.** Поперечный разрез элемента смесового устройства данного типа приведен на рис. 6. Используются те же сопловые лопатки, что и в предыдущем устройстве. Инжекция рабочего газа производится через трубчатый инжектор. Трубки расположены в плоскости симметрии сопла в один ряд. Рассмотрены два варианта инжектора. Первый инжектор содержит в одном сопле 62 трубки с внешним диаметром 0,11 см и внутренним диаметром 0,0866 см. Второй содержит 22 трубки с внешним и внутренним диаметром 0,27 и 0,2 см соответственно. Диаметр трубок выбран так, что расход через одну трубку в этом инжекторе эквивалентен расходу через три трубки в трехрядном трубчатом инжекторе. Численно исследовалась зависимость энергетических характеристик от состава рабочего газа.

При рассмотрении первого варианта инжектора молярное содержание йода в газе-носителе (азоте) варьировалось в диапазоне от 0,005 до 0,2. Результаты расчетов энергетических характеристик лазера с инжектором с 62 трубками (только варианты с генерацией излучения) приведены в табл. 3. Из результатов следует, что максимальные значения энергосъема, мощности излучения и химической эффективности реализуются для инжектируемой струи, содержащей в буферном газе 1,5 % молекулярного йода. Для этого состава  $P = 18,1$  кВт;  $E_{ген} = 44,3$  Дж/г;  $\chi = 5,3$  %.

Иллюстрация картины перемешивания энергонесущего и рабочего потоков для состава рабочей смеси  $0,015 I_2 + 0,985 N_2$  приводится на рис. 7 (см. также цветную вкладку), где показаны изоповерхности концентрации СК. Как видно из этого рисунка, на входе в резонатор потоки практически не перемешаны. Около 80 % СК не участвует в образовании активной среды.

Для инжектируемого потока, имеющего молярный состав  $0,015 I_2 + 0,985 N_2$ , исследовалась зависимость энергетических характеристик от места инъекции рабочего потока. Были проведены расчеты для четырех различных положений инъекционных трубок. Из полученных результатов следует, что расположение инъекционных трубок для однорядного инжектора слабо влияет на степень перемешивания потоков и соответственно на параметры генерации.

Для следующего варианта соплового устройства с однорядным инжектором, с трубками большого диаметра (22 трубки на сопло, внешний и внутренний диаметры 0,27 и 0,2 см), молярное содержание йода в буферном газе (азоте) варьировалось в диапазоне от 0,005 до 0,05. Отношение расходов рабочего и энергонесущего потоков ( $S_{раб}/S_{эн}$ ) в зависимости от содержания молекулярного йода для этого сопла изменялось в диапазоне  $0,355 \div 0,455$ . Результаты расчетов энергетических характеристик (только варианты с генерацией излучения) представлены в табл. 4.

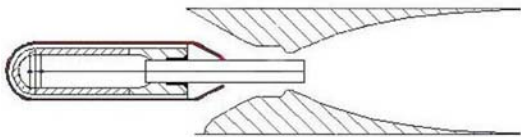


Рис. 6. Схема однорядного трубчатого инжектора

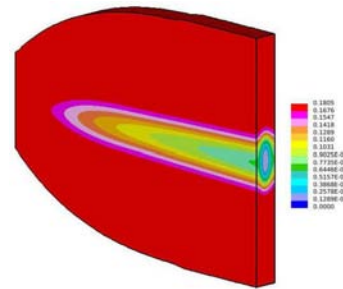


Рис. 7. Изоповерхности концентрации СК при использовании однорядного инжектора с 62 трубками

Таблица 3

Зависимость энергетических характеристик лазера от содержания йода  $\alpha_{I_2}$  в инжектируемом газе для однорядного инжектора с 62 трубками

$\alpha_{I_2}$	$P$ , кВт	$W$ , Вт/см <sup>2</sup>	$E_{ген}$ , Дж/г	$\chi$
0,01	16	26,7	39,3	0,047
0,015	18,1	30,2	44,3	0,053
0,02	16	26,7	39,1	0,047
0,025	9,8	16,3	25,9	0,029



Зависимость энергетических характеристик лазера от содержания йода  $\alpha_{I_2}$  в инжектируемом газе для однорядного инжектора с 22 трубками

$\alpha_{I_2}$	$P$ , кВт	$W$ , Вт/см <sup>2</sup>	$E_{\text{ген}}$ , Дж/г	$\chi$
0,01	36,1	60,2	86,7	0,124
0,015	38,5	64,2	91,9	0,132
0,02	31,6	52,7	75,2	0,108
0,025	19,5	32,5	31,8	0,065

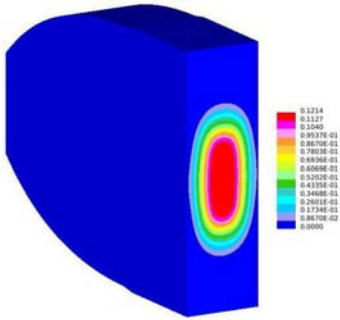


Рис. 8. Изоповерхности концентрации молекулярного йода в случае однорядного инжектора с 22 трубками

Из полученных результатов следует, что максимальные значения характеристик лазера реализуются для инжектируемой струи, содержащей 1,5 % молекулярного йода. В этом случае мощность излучения составляет 38,5 кВт, удельный энергопотребление  $\approx 92$  Дж/г, химическая эффективность 13,2 %.

Иллюстрация картины перемешивания приводится на рис. 8 (см. также цветную вкладку), где иллюстрируется форма струи молекулярного йода до входа в резонатор. Видно, что на входе в резонатор потоки не перемешаны. Около 40 % СК не участвует в образовании активной среды. Для этого варианта отношение расходов рабочего и энергонесущего потоков более чем в два раза выше по сравнению с трехрядным инжектором. За счет большого содержания молекулярного йода происходит более сильная релаксация СК, приводящая к нагреву и торможению потока. Значительная часть струи, содержащей молекулярный йод, не перемешана с энергонесущим потоком.

**Плоский инжектор в критическом сечении сопла.** Поперечные разрезы элемента смесового устройства данного типа приведены на рис. 9. В этом устройстве инжекция рабочего газа производится под углом около  $9^\circ$  к плоскости симметрии сопла через прямоугольные отверстия размером  $0,06 \times 0,1$  см инжектора, расположенного в дозвуковой области соплового блока. Далее инжектируемые струи расширяются в закритическую область сопла через прямоугольные каналы, выполненные в стенках сопловых лопаток и проходящие через критическое сечение (сопловая лопатка типа *расческа*). Каналы на противоположных инжекторах расположены в шахматном порядке. Ширина каналов и расстояние между ними 0,1 см.

Для этого устройства, как и для предыдущих, численно исследовалась зависимость энергетических характеристик от состава рабочего газа. Молярное содержание йода в газе-носителе (азоте) варьировалось в диапазоне от 0,005 до 0,04. Отношение расходов рабочего и энергонесущего потоков  $S_{\text{раб}}/S_{\text{эн}}$  в зависимости от содержания молекулярного йода для этого сопла изменялось в диапазоне  $0,538 \div 0,59$ .

Результаты расчетов энергетических характеристик (только варианты с генерацией излучения) представлены в табл. 5. Максимальная мощность и химическая эффективность составили соответственно  $\approx 70$  кВт и 19,6 %. На рис. 10 (см. также цветную вкладку) показано поле концентрации СК.

Из полученных результатов следует, что на начальном участке перемешивания косые скачки уплотнения и волны разрежения, образующиеся при взаимодействии потоков, деформируют струю, увеличивая площадь взаимодействия рабочего и энергонесущего потоков. В этой области происходит наиболее эффективное формирование активной среды. На входе в резонатор неоднородности в газодинамических параметрах (давлении, температуре и числе Маха) не превышают 20 %. В то же время часть инжектируемой струи практически еще не охвачена перемешиванием. Для данной конструкции смесового устройства отношение расходов рабочего и энергонесущего потоков составляет  $\sim 0,5$ . Оптимальные значения энергетических характеристик достигаются при содержании в



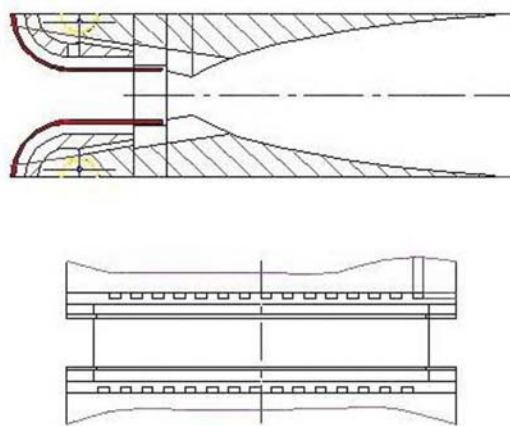


Рис. 9. Схема смесового устройства с инъекцией йода в критическом сечении (сопловая лопатка типа расческа)

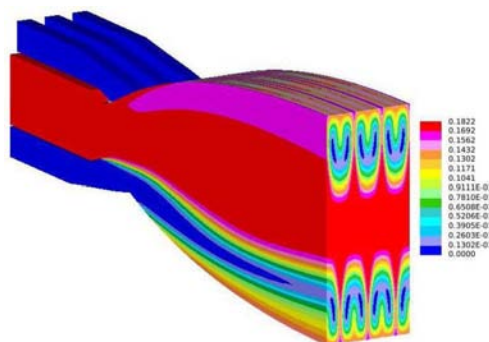


Рис. 10. Распределение концентрации СК в случае плоского инжектора в критическом сечении сопла

Таблица 5

**Зависимость энергетических характеристик лазера от содержания йода  $\alpha_{I_2}$  в инжектируемом газе для плоского инжектора**

$\alpha_{I_2}$	$P$ , кВт	$W$ , Вт/см <sup>2</sup>	$E_{ген}$ , Дж/г	$\chi$
0,005	69,4	115,7	118,8	0,196
0,01	58,2	97	100,8	0,164

рабочем потоке от 0,5 до 1 % молекулярного йода. В этом случае основная наработка активной среды происходит в области резонатора. При большом содержании йода наработка активной среды и релаксация запасенной энергии происходят на начальном участке взаимодействия потоков. Это приводит к нагреву и торможению потока.

**Инъекция со стенок сопловых лопаток в сверхзвуковой области.** Данная конструкция соплового блока интересна тем, что экспериментально получена высокая (33 %) химическая эффективность ХКИЛ [10]. Как и в предыдущем случае, смесовое устройство не загромождает дозвуковую область и критическое сечение сопла трубками и центральным телом инжектора, и должны быть меньшие потери СК при транспортировке к области смешения с йодом.

Инжекция рабочего газа производилась через цилиндрические каналы (отверстия) в сопловых лопатках, расположенных на расстоянии 0,2 см от критического сечения в области сверхзвукового потока (рис. 11). Каналы на противоположных сопловых лопатках расположены в шахматном порядке. Диаметр отверстий 0,05 см, расстояние между отверстиями 0,1 см. Оси инжекционных отверстий направлены по нормали к стенкам сопла в точках инъекции.

Расчеты перемешивания потоков и энергетических характеристик были проведены для различных составов рабочего газа. Молярное содержание йода в газе-носителе (азоте) варьировалось в диапазоне 0,01 ÷ 0,03.

Результаты расчетов энергетических характеристик представлены в табл. 6, из которой видно, что мощность генерации и химическая эффективность растут с увеличением содержания йода в инжектируемом газе. Максимальная мощность составила 74,9 кВт, а химическая эффективность 0,229. Для данной конструкции смесового устройства оптимальные энергетические характеристики лежат в области  $\approx 3 \div 5$  % содержания молекулярного йода в рабочем потоке. Смешение потоков иллюстрирует рис. 12 (см. также цветную вкладку), где показано поле концентрации СК.

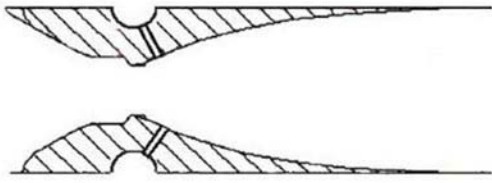


Рис. 11. Схема смесового устройства с инъекцией йода со стенок сопловых лопаток в сверхзвуковой области

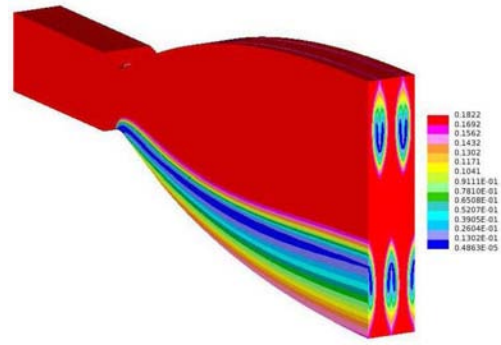


Рис. 12. Распределение концентрации СК при инъекции йода со стенок сопловых лопаток

Таблица 6

**Зависимость энергетических характеристик лазера от содержания йода  $\alpha_{I_2}$  в инжектируемом газе при инъекции йода со стенок сопловых лопаток**

$\alpha_{I_2}$	$P$ , кВт	$W$ , Вт/см <sup>2</sup>	$E_{ген}$ , Дж/г	$\chi$
0,01	43,4	72,3	117,7	0,132
0,015	67	111,7	177,6	0,205
0,02	72,2	120,3	192,3	0,220
0,03	74,9	124,8	196,3	0,229

### Общие выводы

Как известно, одним из важнейших процессов, определяющих эффективность работы ХКИЛ, является смешение энергонесущего (СК с буферным азотом) и излучающего (молекулярного йода с газом-носителем) газов. Требования к процессу смешения очень противоречивы. С одной стороны, для формирования активной среды необходимо смешать компоненты как можно быстрее, что, в свою очередь, приводит к быстрому росту температуры за счет релаксационных процессов и снижению запасенной энергии и коэффициента усиления активной лазерной смеси в области резонатора. Ускорение смешения обеспечивается использованием мелкомасштабной структуры потоков и подходящей геометрией смесового устройства. С другой стороны, для обеспечения максимальной запасенной энергии в области резонатора смешение компонентов должно быть затянуто по времени. В этом случае в области резонатора будем иметь активную среду с большой неоднородностью по запасенной энергии и коэффициенту усиления активной среды, что снижает характеристики генерации и отрицательно сказывается на расходимости лазерного излучения. Таким образом, для получения максимальной мощности излучения лазера необходимо оптимизировать параметры рабочей среды, масштаб смешения и положение резонатора.

С точки зрения расчетного моделирования наиболее трудоемкой является оптимизация параметров энергонесущего газа, поскольку для каждого набора параметров необходимо рассчитывать трехмерное нестационарное до- и трансзвуковое течение, что требует больших затрат счетного времени. Поэтому для расчетного моделирования выходных энергетических характеристик были выбраны параметры энергонесущего газа, соответствующие только одной характерной экспериментальной точке. В такой ситуации результаты, полученные при варьировании других параметров (состава инжектируемого газа, геометрии смешения, коэффициента отражения выходного зеркала резонатора), являются не совсем точными. Строго говоря, для каждого варианта смесового устройства необходимо проводить многофакторную оптимизацию. Только тогда можно получить более объективную информацию и сделать более определенные выводы. Поэтому приводимые здесь выводы и рекомендации следует рассматривать как предварительные. Тем не менее полученные результаты позволяют определить направления, в которых необходимо проводить дальнейшие исследования.

Из анализа полученных результатов можно сделать вполне определенные выводы. Видно, что ни одно из исследованных смесевых устройств не обеспечивает хорошего качества смешения потоков на длине сопловой лопатки. Значительное количество СК (до 30–50 %) не перемешивается с молекулярным йодом и выносится из соплового блока. Хотя ниже по потоку газа смешение йода с СК продолжается, но, как показывают результаты расчетов, даже для самого лучшего смесового устройства с трехрядным инжектором йода около 20 % СК выносится из резонатора и не участвует в формировании активной лазерной среды. Тем не менее даже в этих условиях исследованные перспективные варианты смесевых устройств обеспечивают мощность излучения лазера 70–75 кВт при химической эффективности 20–23 %.

Наблюдается хорошая корреляция и при сравнении результатов расчета с экспериментальными данными [11]: эксперимент — 90 кВт при химической эффективности около 32 %, расчет — 99 кВт при химической эффективности около 35 %.

### Заключение

Численно исследованы энергетические характеристики сверхзвукового ХКИЛ со смесевыми устройствами различных типов. Для каждого типа смесового устройства определены оптимальные условия по геометрии и составу инжектируемого газа, при которых реализуются максимальные энергетические характеристики лазера. Показано, что все рассмотренные конфигурации смесевых устройств применимы и позволяют получить достаточно высокие энергетические характеристики ХКИЛ. Максимальные характеристики в настоящее время получены для соплового блока с трехрядным трубчатый инжектором: мощность излучения около 99 кВт, удельный энергосъем 300 Дж/г, химическая эффективность 35 %, что хорошо согласуется с достигнутыми экспериментальными результатами.

### Список литературы

1. Басов Н. Г., Загидуллин М. В., Игошин В. И. и др. Теоретический анализ химических кислородно-йодных лазеров // Труды ФИАН. 1986. Т. 171. С. 30–53.
2. Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа. М.: Наука, 1970.
3. Бобровский В. В., Дидюков А. И., Кулагин Ю. А. и др. Скорости гомогенных и гетерогенных процессов с участием молекул синглетного кислорода: Препринт № 206. М.: ФИАН, 1988.
4. Launder B. V., Spalding D. B. Lectures on Mathematical Model of Turbulence. London—New-York: Acad. Press, 1972.
5. Выскубенко Б. А., Дерюгин Ю. Н., Кириллов Г. А. и др. Сравнение результатов двумерных расчетов смесевых ГДЛ с данными эксперимента // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Методики и программы численного решения задач математической физики. 1983. Вып. 3 (4). С. 18–21.
6. Adamenkov A. A., Derjugin Yu. V., Vyskubenko B. A. et al. Oxygen-iodine laser research at RFNC-VNIIEF // Proc. SPIE. 1998. Vol. 3574. P. 326–331.
7. Vyskubenko B. A., Krukovsky I. M., Adamenkov A. A. et al. Investigation of the singlet oxygen generator with the twisted flow // Conf. on Lasers and Electro-Optics Europe (CLEO®/Europe). Edinburg, 14–18 September 1998.
8. Годунов С. К., Забродин А. В., Иванов М. Я. и др. Численное решение многомерных задач газовой динамики. М.: Наука, 1976.
9. Копчёнов В. И., Крайко А. Н. Монотонная разностная схема второго порядка для гиперболических систем с двумя независимыми переменными // Журнал вычисл. мат. и мат. физ. 1983. Т. 23, № 4. С. 848–858.
10. Rosenwaks S., Rybalkin V., Katz A., Barmashenko B. Recent studies of Ben-Gurion University high efficiently supersonic chemical oxygen-iodine laser // Proc. SPIE. 2004. Vol. 5777. P. 87–95.

11. *Адаменков А. А., Бакшин В. В., Богачёв А. В. и др.* Стенд для изучения перспектив промышленного применения кислородно-йодного лазера // Квантовая электроника. 2007. Т. 37, № 7. С. 601—602.

Статья поступила в редакцию 02.04.12.

---