

Сверхзвуковой кислородно-иодный лазер мощностью 1.4 кВт с длиной усиления 5 см и разбавлением активной среды азотом

М.В.Загидуллин, В.Д.Николаев, М.И.Свистун, Н.А.Хватов

Разработан малогабаритный химический кислородно-иодный лазер со струйным генератором синглетного кислорода, работающий при разбавлении активной среды азотом. Максимальная химическая эффективность 24.1% была достигнута при расходе хлора 39.2 ммоль/с, а максимальная выходная мощность 1.4 кВт – при расходе хлора 75 ммоль/с. Получены следующие удельные энергетические характеристики излучения лазера: мощность 5 кВт на 1 л объема реактора струйного генератора синглетного кислорода, интенсивность потока на оптической оси 100 Вт на 1 см² поперечного сечения потока активной среды в резонаторе и мощность на единицу объемной скорости откачки 2.7 Вт/(л/с).

Ключевые слова: генератор синглетного кислорода, кислородно-иодный лазер.

Введение

В настоящее время возрос интерес к возможности создания кислородно-иодного лазера (КИЛ) для различных технологических применений [1, 2]. Особый интерес представляет использование КИЛ мощностью 10–30 кВт для монтажа и разборки элементов стальных толстостенных конструкций атомных реакторов. По оценкам экспертов, потребность в разборке атомных реакторов резко возрастет в начале следующего столетия, когда отслужат свой срок реакторы, созданные в 60–70-е гг. [3]. КИЛ может найти применение в таких областях, как резка толстостенной стали в судостроении, сварка алюминиевых конструкций, сварка и резка под водой. Хорошее прохождение излучения КИЛ по стекловолокну позволяет роботизировать лазерные комплексы на его основе.

Стоимость лазерной энергии и капитальные затраты будут играть важную роль при выборе КИЛ как технологического оборудования. Для снижения капитальных затрат и стоимости энергии КИЛ существенное значение имеет уменьшение необходимой объемной скорости прокачки активной среды, а также стоимости исходных химических компонентов и буферного газа [4].

В качестве разбавителя активной среды предпочтительно использовать азот, который значительно дешевле гелия и может легко транспортироваться в конденсированном состоянии. Ранее было показано, что использование газообразного азота при температуре около 100 К в качестве разбавителя позволяет достичь химической эффективности в сверхзвуковом КИЛ, сравнимой с эффективностью, полученной при разбавлении активной среды гелием [5]. Подачу азота как разбавителя активной среды лазера можно осуществлять прямо из баллонов с жидким азотом, что значительно уменьшит массо-габаритные характеристики мобильного лазерного комплекса.

Одновременно отпадает необходимость глубокого газодинамического охлаждения активной среды путем ее разгона до больших сверхзвуковых скоростей, при которых неизбежны потери полного давления.

Важнейшей технической характеристикой КИЛ является химическая эффективность η , которая определяется как отношение числа излученных лазером фотонов к числу молекул хлора, введенных в генератор синглетного кислорода. Выражение для η можно представить в виде

$$\eta = \frac{W}{90.6G_{Cl}},$$

где W – полная выходная мощность лазера (в Вт); G_{Cl} – расход хлора (в ммоль/с) в генераторе синглетного кислорода. До сих пор вопрос о возможности получения высокой химической эффективности КИЛ при разбавлении активной среды азотом и высоком давлении в резонаторе оставался открытым. В работе [3] была достигнута эффективность $\sim 15\%$ при расходе хлора 70 ммоль/с в КИЛ с длиной усиления 5 см.

Основной особенностью работы лазера при разбавлении его активной среды азотом по сравнению с разбавлением ее гелием является уменьшение объемной скорости потока в газопроточной части лазера, что ведет к росту всех давлений и увеличению времени транспортировки $O_2(^1\Delta)$. Это сопровождается потерями $O_2(^1\Delta)$ при его тушении и увеличением его парциального давления в области смешения с парами иода, в связи с чем требования к компоновке элементов такого КИЛ и узлу смешения резко возрастают. Возникает необходимость увеличения площади критического сечения сверхзвукового сопла для снижения перед ним давления и уменьшения времени смешения кислорода с азотом для снижения потерь $O_2(^1\Delta)$. В то же время увеличение площади критического сечения сопла при сохранении степени расширения сверхзвукового потока ограничено доступной скоростью объемной откачки.

В данной работе в условиях ограниченной объемной прокачки мы попытались максимально учесть все эти факторы, связанные с работой КИЛ при разбавлении его

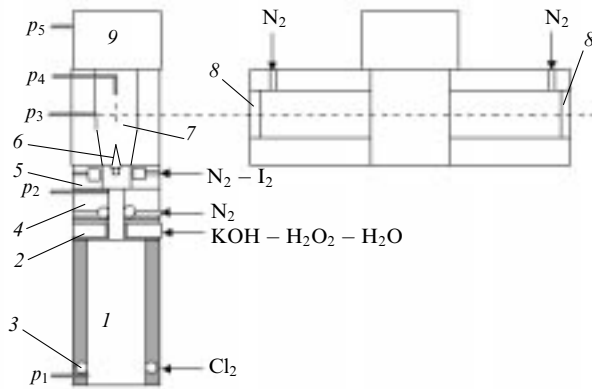


Рис. 1. Схема кислородно-иодного лазера с указанием местоположения датчиков давления p_i в его газопроводной части: 1 – струйный генератор синглетного кислорода; 2 – сопловая решетка; 3 – инжектор хлора; 4 – смесительная камера; 5 – иодный смеситель; 6 – сопла; 7 – щелевой канал; 8 – зеркала резонатора; 9 – выхлопная труба.

активной среды азотом. Струйный генератор синглетного кислорода (СГСК) позволяет практически полностью утилизировать хлор и получать кислород при давлении в десятки мм рт. ст. с высоким содержанием $O_2(^1\Delta)$ [6]. Наиболее гибкой, особенно с точки зрения масштабирования, является конструкция СГСК с выводом потока кислорода вертикально вверх через центральное отверстие в сопловой решетке, через которую щелочной раствор перекиси водорода подается в реактор [7].

В настоящей работе проводятся параметрические исследования и оптимизация мощности КИЛ с длиной усиления 5 см на основе СГСК с вертикальным выводом потока. Газопроводную часть этого лазера, включающую в себя СГСК, камеру смешения $O_2(^1\Delta)$ с буферным газом, смеситель паров иода и сопло, можно рассматривать как отдельную секцию. Газопроводная часть мощного КИЛ может состоять из набора подобных секций.

1. Описание установки и измерения

Общий вид установки КИЛ показан на рис.1. Синглетный кислород $O_2(^1\Delta)$ образуется в противоточном реакторе 1 с поперечным сечением 34×50 мм в результате взаимодействия потока хлора со струями и каплями щелочного раствора перекиси водорода. Щелочной раствор перекиси водорода приготавливался из 5 л 50 %-ной перекиси водорода и 5 л 46 %-ного КОН. При температуре -15°C и полном давлении от 1 до 3 атм он подавался в форкамеру сопловой решетки 2 и через ее отверстия инжектировался в реактор. Газообразный хлор вдувался в реактор через инжектор 3, представляющий собой перфорированные трубки, вмонтированные в стенки реактора.

Из реактора поток кислорода выводился через центральное щелевое отверстие сопловой решетки. Инжектор хлора расположен на расстоянии 165 мм от сопловой решетки. Буферный газ азот (первичный азот) подмешивался к кислороду через систему отверстий, просверленных в двух никелевых трубках, которые вмонтированы в стенки смесительной камеры 4, имеющей поперечное сечение 10×50 мм и длину вдоль потока 60 мм. Для предварительного охлаждения смеси $O_2 - N_2$ первичный азот пропусклся через медную спираль, погруженную в жидкий азот. Перед иодным смесителем 5 высота смеситель-

ной камеры увеличивается от 10 до 20 мм. Поток смеси $O_2 - N_2$ втекает в иодный смеситель, имеющий две горловины с поперечным сечением 7.5×50 мм каждая. Пары иода с несущим газом азотом (вторичным азотом) подмешиваются к потоку $O_2 - N_2$ через систему отверстий, просверленных в боковых стенках иодного смесителя и в центральной трубке, расположенной между горловинами. Погрешность измерения расхода иода составляла 5 %. Затем два потока активной среды расширяются в соплах 6 и после слияния в щелевом канале 7 поступают в активную зону резонатора с размерами вдоль потока и вдоль оптической оси 45 и 50 мм соответственно. Стенки щелевого канала 7 развернуты относительно оси потока на угол $\sim 2.5^\circ$ для компенсации влияния пограничных слоев на газовый поток.

Оптический резонатор был образован парой зеркал 8 диаметром 50 мм с радиусом кривизны 5 м и расстоянием между ними 63 см. Высота канала активной части резонатора на оптической оси равнялась 28 и 30 мм соответственно при расстоянии 55 и 80 мм между горловиной иодного смесителя и оптической осью резонатора. В так называемые рукава резонатора подавался азот для защиты зеркал от возможного попадания на них аэрозоля щелочного раствора перекиси водорода. Проток азота через рукава необходим также для вытеснения из них застойного газа, в котором возможно резонансное поглощение излучения. Из резонатора газовая смесь через щелевое отверстие с сечением 30×50 мм поступает в выхлопную трубу 9 ($\varnothing 100$ мм). Откачка активной среды производилась насосом АВЗ-125. Для создания высокой кратковременной скорости откачки выхлоп газа параллельно осуществлялся в вакуумный ресивер объемом 4 м³. Продувка газопроводной части азотом показала, что в первую секунду объемная скорость откачки за резонатором составляла 630 л/с. Через 5 с она уменьшалась до 520 л/с из-за роста противодействия в ресивере.

Вывод кислорода через центральное отверстие в сопловой решетке 2 создает ряд благоприятных условий, способствующих повышению производительности генератора синглетного кислорода и дающих возможность его геометрического масштабирования. Как было установлено ранее [6], в СГСК с выводом кислорода через боковое отверстие в стенке реактора одной из причин, вызывающих повышение содержание капель раствора в резонаторе с ростом плотности потока хлора, являлось увлечение газовым потоком пленки раствора со стенок реактора.

При выводе кислорода через центральное отверстие в сопловой решетке появление капель раствора возможно только путем генерации этих капель в реакторе и уноса их газовым потоком из объема. Образование мелких капель раствора, увлекаемых газовым потоком, может происходить как при разрушении пленки раствора на стенках реактора, так и при распаде струй и крупных капель. В результате в конструкции СГСК с центральным отверстием в сопловой решетке ожидается меньшее содержание капель раствора в выходящем потоке кислорода. При данной компоновке лазера устраняются многие проблемы масштабирования КИЛ, которые характерны для традиционных схем СГСК с выводом газового потока через отверстие в боковой стенке реактора.

Выход $O_2(^1\Delta)$ и остаточное содержание хлора в газовом потоке из СГСК зависят от поверхности контакта хлора с раствором, давления и времени пребывания газа

в реакторе. Давление и скорость газа в реакторе определяются геометрическими размерами центрального отверстия в сопловой решетке и противодавлением в смесительной камере. Противодействие в смесительной камере зависит как от расхода первичного и вторичного азота, так и от площади поперечного сечения горловины сопла. Вариация расходов первичного и вторичного азота влияет в свою очередь на режим смешения и диссоциацию паров иода в иодном смесителе и на степень газодинамического охлаждения активной среды. Таким образом, при отсутствии газодинамической развязки между СГСК и иодным смесителем, как это было в работе [5], задача оптимизации КИЛ значительно усложняется.

Давления в реакторе (p_1), в смесительной камере (p_2), статическое давление в резонаторе (p_3), в трубке полного давления на выходе из резонатора (p_4) и в газовакуумном тракте (p_5) в процессе работы лазера измерялись датчиками типа «Сапфир». Погрешность измерения давлений составляла 1%. Для оценки характера течения активной среды число Маха M на оси газового потока в резонаторе рассчитывалось по формуле [8]

$$\frac{p_4}{p_3} = \frac{166.7M^7}{(7M^2 - 1)^{2.5}}$$

Газообразный хлор подавался в СГСК из эластичного пластикового пакета, находящегося при атмосферном давлении, куда он в свою очередь перепускался из баллона с жидким хлором. Дозировки расходов хлора и азота осуществлялись калиброванными расходными шайбами. Погрешность измерения расхода хлора и азота составляла 6%.

Выходная мощность лазера измерялась прибором LPM-905, который имеет постоянную времени 0.5 с, верхний предел измерения по мощности 30 Вт и погрешность измерения 5%. Лазерный пучок, выходящий через зеркало с большим коэффициентом пропускания, последовательно отражался от двух плоскопараллельных пластин, а затем двумя линзами фокусировался на чувствительный элемент измерителя мощности. При максимально возможном размере выходного лазерного пучка оптическая система обеспечивала его полный перехват чувствительным элементом прибора LPM-905.

Из-за низкого коэффициента усиления среды для получения максимальной выходной мощности лазера приходилось использовать зеркала с пропусканием 1–2%. В этих условиях мощность излучения внутри резонатора составляет около 100 кВт и установка глухих зеркал с пропусканием менее 0.1% приводит к их быстрому разрушению, поскольку такие зеркала, как правило, имеют большие поглощение и светорассеяние. По этой причине часто оказывалось целесообразным использовать и второе зеркало с коэффициентом пропускания T_2 , сравнимым с коэффициентом пропускания выходного зеркала. Считалось, что полная выходная мощность лазера $W = W_1(T_1 + T_2)/T_1$, где W_1 – измеренная мощность излучения, выходящего через зеркало с коэффициентом пропускания T_1 .

2. Результаты

Последовательность действий при запуске лазера на короткое время (примерно на 5 с) состояла в следующем. Проточная часть лазера откачивалась насосом АВЗ-125, потом включались обдув зеркал, напуск первичного и

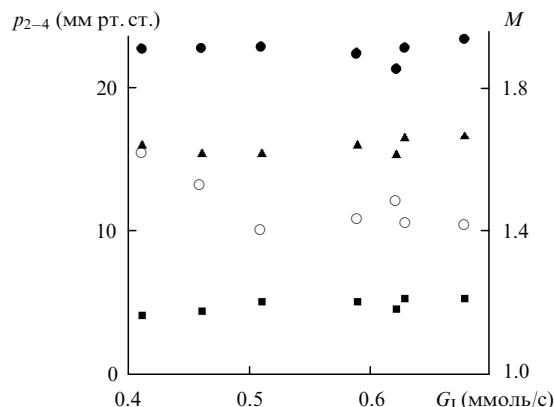


Рис.2. Зависимости давлений в газопроточной части лазера p_2 (●), p_3 (■), p_4 (▲) и числа Маха (○) потока в резонаторе от расхода иода G_1 при соотношении расходов газов $G_{Cl}:G_{NP}:G_{NS} \approx 1:2:1$.

вторичного азота, устанавливался расход паров иода, затем в реактор последовательно подавались щелочной раствор перекиси водорода и хлор. После этого открывался вакуумный ресивер. При условии устойчивого дозвукового или сверхзвукового течения активной среды в резонаторе через 2 с устанавливались стационарные давления p_1, p_2, p_3, p_4 и лазерная мощность, которые до конца пуска лазера не изменялись. Длительность работы лазера (равная 5 с) ограничивалась только запасом щелочного раствора перекиси водорода в питающем баке.

Ранее при работе КИЛ с моносоплом и инжекцией паров иода вблизи горловины сопла мы установили оптимальное соотношение $G_{Cl}:G_{NP}:G_{NS} \approx 1:2:1$ для молярных расходов хлора (G_{Cl}), первичного (G_{NP}) и вторичного азота (G_{NS}) [5]. При продувке газопроточной части настоящего лазера потоком с таким соотношением расходов и заменой хлора азотом с расходом 39.2 ммоль/с числа Маха для потока в резонаторе равнялись 1.72 и 1.8 при расстояниях от оптической оси до горловины сопла $d = 55$ и 80 мм соответственно. При идеальном изозетропическом расширении числа Маха для потока должны были получиться равными соответственно 2.18 и 2.25. Отличие полученных значений от расчетных можно объяснить неидеальным профилированием сопла, наличием сил трения и влиянием подмешивания вторичного потока в первичный вблизи критического сечения сопла.

Первоначально эксперименты проводились при $d = 55$ мм и соотношении $G_{Cl}:G_{NP}:G_{NS} \approx 1:2:1$, как и в работе [5]. Расход хлора составлял 39.2 ммоль/с. При этом давление в реакторе равнялось 35 мм рт. ст. Расход азота через каждый рукав резонатора составлял 1.36 ммоль/с. На рис.2 показана зависимость измеряемых давлений и числа Маха для потока в резонаторе от расхода иода G_1 . К концу пятой секунды работы лазера давление p_5 превышало статическое давление в резонаторе на 1–1.5 мм рт. ст. Слабая зависимость p_2 от G_1 указывает на отсутствие значительного тепловыделения в области подмешивания паров иода, где $M < 1$.

С другой стороны, рост давления p_3 в резонаторе при увеличении расхода иода указывает на нагрев потока в сверхзвуковой части сопла. Зависимость выходной мощности от G_1 для различных условий представлена на рис.3. Видно, что выходная мощность существенно зависит не только от суммарного коэффициента пропускания зеркал, установленных в резонаторе, но и от их качества. Максимальная выходная мощность была достигнута

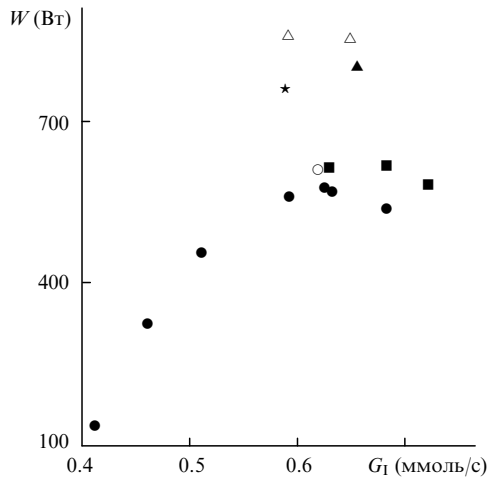


Рис.3. Зависимости мощности лазера W от расхода иода G_I при соотношении расходов газов $G_{Cl}:G_{NP}:G_{NS} \approx 1:2:1$ и различных пропусканиях зеркал резонатора (● – $T_1 = 0.9\%$, $T_2 = 0$; ○ – $T_1 = 0.9\%$, $T_2 = 0$ (охлажденный первичный азот); ■ – $T_1 = 1.3\%$, $T_2 = 0$; ▲ – $T_1 = 1\%$, $T_2 = 0$; △ – $T_1 = 1\%$, $T_2 = 0$ (охлажденный первичный азот); ★ – $T_1 = T_2 = 0.7\%$).

при использовании зеркал с $T_1 = 1\%$, $T_2 = 0$ и составила 858 Вт ($\eta = 24.1\%$) при охлаждении первичного азота до 80 К и 798 Вт ($\eta = 22.4\%$) для первичного азота при комнатной температуре.

Для снижения давления p_1 и увеличения скорости газа в реакторе противодавление p_2 было уменьшено путем снижения расхода первичного азота G_{NP} до G_{Cl} . В этом случае p_1 уменьшилось с 35 до 28 мм рт. ст., однако режим сверхзвукового течения в резонаторе стал неустойчивым. Увеличение расхода иода приводило сначала к монотонному росту выходной мощности, но затем генерация, не достигнув максимальной интенсивности, прекращалась, а поток в резонаторе становился дозвуковым с числом Маха $M = 0.66$.

При увеличении d до 80 мм переход потока в резонаторе в дозвуковой режим стал наблюдаться и при большей теплоемкости газа. Для комплекта зеркал с $T_1 = 0.9\%$, $T_2 = 0$ и соотношения $G_{Cl}:G_{NP}:G_{NS} \approx 1:2:1$ при расходе иода 0.47 ммоль/с выходная мощность составила 467 Вт и оказалась выше, чем выходная мощность при $d = 55$ мм. При этом число Маха потока в резонаторе $M = 1.43$. Однако увеличение G_I до 0.54 ммоль/с уже приводило к переводу потока в резонаторе в дозвуковой режим и срыву генерации лазера.

В процессе некоторых пусков длительностью 5 с можно было наблюдать переход от сверхзвукового течения активной среды к дозвуковому (рис.4). Здесь до момента времени t_1 газопроточная часть откачивалась только насосом АВЗ-125, а в момент времени t_1 открывался клапан вакуумного ресивера. На отрезке времени от t_2 до t_3 реализовывался сверхзвуковой режим с $M = 1.4$ и возникала генерация. Затем давление в резонаторе резко увеличивалось, генерация срывалась, а поток в резонаторе переходил в дозвуковое течение с числом Маха $M = 0.64$. Такое поведение указывает на неустойчивость сверхзвукового течения активной среды. Видимо, увеличение длины сверхзвуковой части сопла на 25 мм в этих условиях приводит к дополнительному тепловыделению и течению газа в сопле происходит вблизи состояния теплового кризиса.

Скорость тепловыделения в активной среде зависит

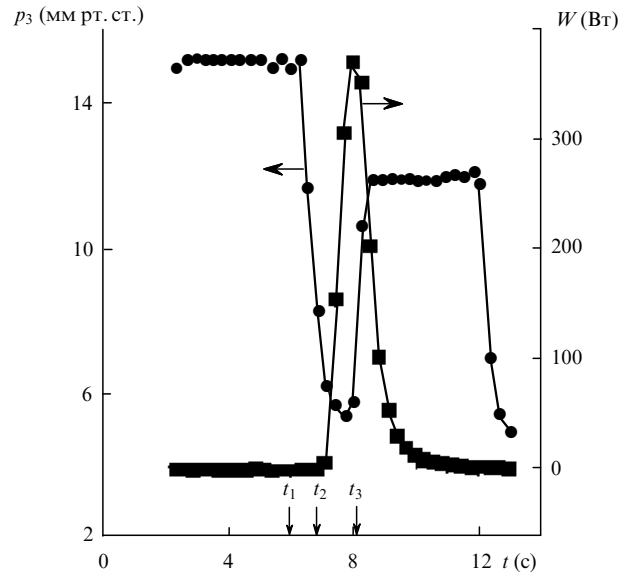


Рис.4. Диаграмма, демонстрирующая переход от сверхзвукового к дозвуковому режиму течения активной среды в резонаторе.

от концентрации иода и паров воды, через которые в конечном итоге происходит деактивация $O_2(^1\Delta)$. Достаточно небольшого увеличения концентрации этих компонентов, чтобы возник тепловый кризис с образованием псевдоскачка давления в сопле. Переход к дозвуковому течению ведет к росту скорости релаксационных потерь $O_2(^1\Delta)$, еще большему разогреву активной среды и срыву генерации лазера. Возможно также, что скачок давления p_3 ведет к перетеканию газа в рукава резонатора, где возникают зона резонансного поглощения излучения атомами иода в основном состоянии и застойные циркуляционные зоны, в которых тушится $O_2(^1\Delta)$. В других пусках лазера в аналогичных условиях, наоборот, после открытия ресивера вначале реализовалось дозвуковое течение без лазерной генерации, а затем поток переходил в сверхзвуковой режим с возникновением лазерной генерации.

Последующие испытания лазера проводились при $d = 55$ мм. Испытания лазера при расходе хлора 68 ммоль/с производились для соотношения $G_{Cl}:G_{NP}:G_{NS} \approx 1:2:1$. Давления в газопроточной части лазера были следующими: $p_1 = 54$ мм рт. ст., $p_2 = 36$ мм рт. ст. Оказалось, что изменение суммарного расхода азота через рукава резонатора от 4.5 до 10.3 ммоль/с при фиксированном расходе иода 0.71 ммоль/с привело к увеличению выходной лазерной мощности от 890 до 1035 Вт при работе с комплектом зеркал с $T_1 = 0.94\%$, $T_2 = 0.9\%$. Одновременно давление в резонаторе возросло с 7.6 до 9.7 мм рт. ст., а число Маха потока в резонаторе упало с 1.49 до 1.39.

Изменение параметров газового потока в резонаторе и рост выходной мощности с ростом расхода азота через рукава резонатора, видимо, связаны с вытеснением из них застойных зон с резонансно поглощающей средой и «поджатием» основного потока. Зависимость выходной мощности от суммарного коэффициента пропускания зеркал представлена на рис.5. По этой зависимости можно оценить, что пороговый коэффициент пропускания зеркал равен $\sim 6\%$.

Увеличение расхода хлора в реакторе ведет к росту давления в нем и уменьшению выхода синглетного кис-

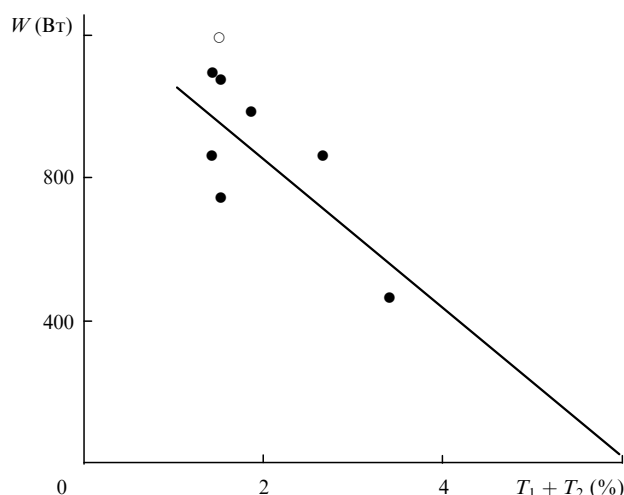


Рис.5. Зависимости мощности лазера W от суммарного пропускания зеркал при $G_{Cl} = 68$ ммоль/с и $G_I = 0.71$ ммоль/с в случаях, когда первичный азот находится при комнатной температуре (●) и когда он предварительно охлажден (○).

лорода. Одновременно возрастает содержание капель раствора в газовом потоке, выходящем из СГСК. Дальнейший рост расхода хлора может нарушить устойчивое течение в реакторе и привести к катастрофическому выбросу раствора в резонатор. В данной работе максимальный расход хлора не превышал 75 ммоль/с, хотя СГСК работал устойчиво при напуске в него азота с расходом вплоть до 100 ммоль/с. Утилизация хлора в СГСК составила 85–90% при работе СГСК с максимальным расходом хлора 75 ммоль/с и давлением в реакторе 65 мм рт. ст.

При работе лазера с расходом хлора 75 ммоль/с и соотношении расходов газов $G_{Cl}:G_{NP}:G_{NS} \approx 1:2:1$ давления в реакторе и смесительной камере равнялись 67 и 42 мм рт. ст. соответственно. Если расход азота при прохождении через рукава резонатора составлял 2.7 ммоль/с, то генерация лазера прекращалась при расходе иода более 0.8 ммоль/с, несмотря на то что течение активной среды в резонаторе по-прежнему было сверхзвуковым с $M \approx 1.5$. Увеличение расхода азота в рукавах резонатора до 6.8 ммоль/с позволило получать устойчивую генерацию лазера при расходах иода вплоть до 0.9 ммоль/с. Максимальная мощность лазера 1030 Вт была достигнута при расходе иода 0.89 ммоль/с и использовании зеркал с $T_1 = 0.94\%$, $T_2 = 0.9\%$.

Результаты испытаний КИЛ.

G_{Cl} (ммоль/с)	G_{NS} (ммоль/с)	G_{NP} (ммоль/с)	T_1 (%)	T_2 (%)	W (Вт)	η (%)	M
23	23.2	46.5	0.7	0.7	390(●)	18.7	1.24
23	23.2	46.5	1	0	429(■)	20.6	1.24
39.2	39.2	78.4	0.9	0	574(○)	16.2	1.48
39.2	43	78.4	1	0	798(■)	22.4	1.52
39.2	40	78.4	1.3	0	642(★)	18.1	1.51
39.2	39.2	78.4	0.7	0.7	764(●)	21.4	1.37
39.2	43	78.4*	1	0	858(□)	24.1	1.38
68	66	66	0.8	0.7	1074(▲)	17.4	1.51
68	66	66*	0.8	0.7	1183(△)	19.2	1.43
75	65.7	135.5	0.7	0.7	1074(●)	15.8	1.5
75	65.7	95.8	0.8	0.7	1303(▲)	19.2	1.4
75	82.	95.8	0.8	0.7	1408(▲)	20.7	1.5

* Данные приведены для охлажденного первичного азота.

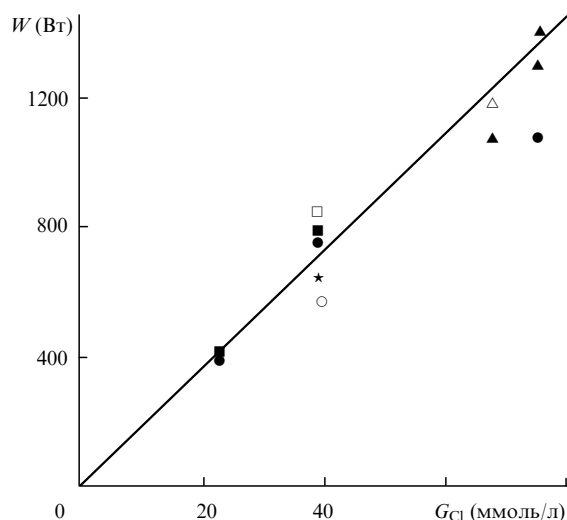


Рис.6. Зависимости мощности лазера W от расхода хлора G_{Cl} . Прямая линия соответствует химической эффективности лазера 20%. Дополнительные условия приведены в таблице.

Падение химической эффективности лазера с ростом расхода хлора от 68 до 75 ммоль/с, очевидно, связано с более высоким давлением в реакторе и меньшим выходом $O_2(^1\Delta)$. Уменьшение расхода первичного азота с 155 до 79 ммоль/с привело к падению давления в реакторе с 67 до 53 мм рт. ст. Однако при этом в резонаторе произошел срыв течения в дозвуковой режим с давлением $p_3 = 14.4$ мм рт. ст. и $M = 0.78$, а генерация лазера прекратилась.

Дополнительное падение расхода вторичного азота до 44 ммоль/с не позволило перевести течение активной среды в сверхзвуковой режим. Увеличение расходов первичного азота до 96 ммоль/с и вторичного азота до 82 ммоль/с вновь вернуло течение активной среды в сверхзвуковой режим с $M = 1.5$. В этих условиях в реакторе давление составило 55 мм рт. ст., а перед соплом – 40 мм рт. ст. После установки нового комплекта зеркал с $T_1 = 0.8\%$ и $T_2 = 0.7\%$ были достигнуты выходная мощность 1408 Вт и химическая эффективность $\eta = 20.7\%$.

Заключение

Таким образом, газопоточную часть разработанного нами малогабаритного химического кислородно-иодного лазера с СГСК вертикальной конструкции и разба-

влением активной среды азотом, можно рассматривать как отдельную секцию. Она включает в себя камеру смешения $O_2(^1\Delta)$ с буферным газом, смеситель паров иода и сопло. Газопроточная часть мощного КИЛ может быть многосекционной.

Итоги испытания химического КИЛ приведены на рис.6 и в таблице вместе с результатами дополнительных испытаний лазера при $G_{Cl} = 23.2$ ммоль/с и соотношении $G_{Cl}:G_{NP}:G_{NS} \approx 1:2:1$. Химическая эффективность лазера в этом случае близка к эффективности лазера с моносоплом и при тех же расходах газов [5].

Максимальная мощность 1.4 кВт достигнута при расходе хлора 75 ммоль/с, а максимальная химическая эффективность 24.1 % получена при расходе хлора 39.2 ммоль/с. Эффективность лазера существенно зависела от прозрачности и качества зеркал, установленных в резонаторе, что отмечалось ранее [9]. При этом если зеркала уже работали при высокой внутрирезонаторной плотности излучения, то затем, как правило, с ними не удавалось достигать той же самой выходной мощности. Вероятно, это объясняется деградацией диэлектрических слоев при интенсивностях излучения примерно 8 кВт/см².

Рост тепловыделения в активной среде или уменьшение ее теплоемкости ведут к тепловому кризису и срыву потока в дозвуковой режим. Это наглядно проявилось при увеличении расстояния между горловиной иодного смесителя и оптической осью от 55 до 80 мм и при уменьшении расходов первичного и вторичного азота. Срыв генерации в дозвуковом режиме можно объяснить резким возрастанием в резонаторе плотностей атомарного и молекулярного иода, паров воды, а также ростом скорости тушения $O_2(^1\Delta)$ и температуры потока.

Приведем некоторые удельные характеристики, которые были достигнуты при испытаниях представленного КИЛ: мощность на единицу площади газового потока в резонаторе 100 Вт/см², мощность на единицу объема реактора 5 кВт/л и мощность на единицу объемной скорости откачки 2.7 Вт/(л/с). Максимальные известные к настоящему времени удельные характеристики 400 Вт/см²

и 4.3 кВт/л достигнуты в работе [7] за счет увеличения линейной скорости газа в реакторе и резонаторе при разбавлении кислорода гелием. В настоящей работе увеличение мощности до 5 кВт на 1 л реакторного объема СГСК достигнуто за счет увеличения рабочего давления в реакторе.

Настоящая работа выполнена при частичной финансовой поддержке Европейского офиса по аэрокосмическим исследованиям и разработкам (EOARD, контракт № F61775-99-WE032) и Американского фонда гражданских научных исследований и разработок (US CRDF).

1. Vetrovec J. *Proc.SPIE*, **3092**, 780 (1997).
2. Endo M., Nagatomo S., Takeda S., Wani F., Nanri K., Fujioka T. *Proc.SPIE*, **3268**, 106 (1998).
3. Carroll D.L., King D.M., Fockler L., Stromberg D., Solomon W.C., Sentman L.H. *Proc. Conf.Lasers'98* (McLean, USA, STS Press, 1999).
4. Von Bulov H., Schall W.O. *Proc.SPIE*, **2502**, 258 (1994).
5. Загидуллин М.В., Николаев В.Д., Свистун М.И., Хватов Н.А., Уфимцев Н.И. *Квантовая электроника*, **24**, 201 (1997).
6. Аязов В.Н., Загидуллин М.В., Николаев В.Д., Свистун М.И., Хватов Н.А. *Квантовая электроника*, **22**, 443 (1995).
7. McDermott W.E., Stephens J.C., Vetrovec J., Dickerson R. *Proc. SPIE*, **2987**, 146 (1997).
8. Абрамович Г.Н. *Прикладная газовая динамика* (М., Наука, 1976, с.146).
9. Rittenhouse T.L., Phipps S.P., Helms C.A., Truesdell K.A. *Proc. SPIE*, **2702**, 333 (1996).

M.V.Zagidullin, V.D.Nikolaev, M.I.Svistun, N.A.Khvatov. Supersonic oxygen-iodine 1.4-kW laser with a 5-cm amplification length and a nitrogen-diluted active medium.

A small-size chemical oxygen-iodine laser with a jet generator of singlet oxygen and a nitrogen-diluted active medium was developed. The maximum chemical efficiency equal to 24.1% was achieved for a chlorine flow rate of 39.2 mmol s⁻¹, and the maximum output power equal to 1.4 kW was obtained for a chlorine flow rate of 75 mmol s⁻¹. The following specific energy characteristics of laser radiation were obtained: output power of 5 kW per one litre of the reactor volume of the jet generator of singlet oxygen, paraxial intensity of 100 W per one square centimetre of the cross sectional area of the stream of the active medium in the resonator, and an output power per unit volume evacuation rate of 2.7 W (litre s⁻¹)⁻¹.