

# Масштабируемый химический кислородно-иодный лазер

А.А.Адаменков, В.В.Бакшин, Б.А.Выскубенко, В.И.Ефремов, С.П.Ильин,  
Ю.Н.Илюшин, Ю.В.Колобянин, Е.А.Кудряшов, М.В.Трошкин

*Обсуждается проблема масштабирования химического кислородно-иодного лазера (ХКИЛ). Приведены результаты экспериментального исследования генератора синглетного кислорода с закрученным аэрозольным потоком газа, отвечающего требованиям масштабируемости ХКИЛ. Экспериментально исследованы также энергетические характеристики сверхзвукового ХКИЛ с системой смешения синглетного кислорода и иода в параллельных потоках. Достигнута мощность излучения  $\sim 7.5$  кВт, что соответствует приведенной мощности  $230$  Вт/см<sup>2</sup>. Максимальная химическая эффективность ХКИЛ составила  $\sim 30\%$ .*

**Ключевые слова:** химический кислородно-иодный лазер (ХКИЛ), масштабирование, генератор синглетного кислорода с закрученным аэрозольным потоком, мощность излучения, химическая эффективность.

## 1. Введение

Для построения высокоэффективного технологического химического кислородно-иодного лазера (ХКИЛ) на основе маломасштабных лабораторных установок требуются масштабируемые исследовательские модели, позволяющие создавать установки с большей мощностью излучения без снижения их удельных характеристик и эффективности. Одна из проблем, возникающая при увеличении масштаба установки, состоит в необходимости обеспечения высокой скорости газа в генераторе синглетного кислорода (ГСК).

В настоящей работе обсуждается проблема масштабирования ХКИЛ и приводятся результаты экспериментальных исследований ГСК с закрученным аэрозольным потоком газа (ЗА ГСК) и лазерной модели, на основе которых был построен ХКИЛ со средней выходной мощностью 50 кВт [1].

## 2. О масштабировании ХКИЛ

Простейший путь построения ХКИЛ с высокой выходной мощностью излучения – это создание модулей, сложением которых в общем резонаторе достигается заданная мощность. На рис.1 представлены схемы организации газовых потоков в сверхзвуковом ХКИЛ, определяющие, в первом приближении, возможность масштабирования путем модульного построения лазера.

Если допустимая скорость газа в ГСК ниже, чем на входе в сопло, то для согласования расходов газов площадь поперечного сечения ГСК должна быть больше площади входной части сопла. Такую ситуацию, характерную, на-

пример, для капельного и струйного ГСК [2, 3], иллюстрирует рис.1,а. При увеличении масштаба установки возрастают потери синглетного кислорода при транспортировке, а также различие между длинами центральных и периферийных траекторий газовых частиц. Релаксация неравновесного потока создает при этом неоднородности как плотности запасенной энергии, так и коэффициента усиления и температуры. В конечном счете снижается эффективность лазера. Особенно это проявляется при повышении давления в потоке, которое привлекательно тем, что позволяет увеличить выходную мощность ХКИЛ при тех же габаритах устройства и облегчает организацию выхлопа отработанных газов.

На рис.1,б показана идеальная для масштабирования схема организации потоков в сверхзвуковом ХКИЛ, когда скорость газа в ГСК равна скорости газа на входе в дозвуковую часть сопла. При этом траектории всех газовых частиц имеют одинаковую длину. В этих условиях можно быть уверенным, что при увеличении масштаба лазерной установки удельные энергетические характеристики и эффективность сохраняются или даже увеличатся за счет повышения эффективности резонатора при большей длине усиления.

Какое значение скорости газа в ГСК позволяет осуществить такую схему организации потоков? Для минимизации потерь полного давления в газовом тракте необходимо, чтобы число Маха сопла  $M$ , при котором сверхзвуковое течение устойчиво, было минимальным. Исходя из этого для сопла, как правило, выбирают  $M \approx 2-3$  [4, 5]. В данном случае скорость потока на входе в сопловую решетку лежит в диапазоне 50–120 м/с. Почти для всех известных ГСК [6] такая скорость газа в реакционной зоне недостижима из-за выноса раствора в лазерный объем, поэтому обычно в лазерных экспериментах максимальная скорость газа в ГСК не превышает 20 м/с. Единственный из известных на сегодняшний день ГСК, для которого скорость газа в зоне реакции может быть более 50 м/с, это ЗА ГСК, разработанный ранее в РФЯЦ–ВНИИЭФ [7].

Ниже приводятся результаты экспериментов с моделью ХКИЛ, построенной на основе ЗА ГСК по схеме, приведенной на рис.1,б, которая наиболее приближена к идеаль-

А.А.Адаменков, В.В.Бакшин, Б.А.Выскубенко, В.И.Ефремов, С.П.Ильин, Ю.Н.Илюшин, Ю.В.Колобянин, Е.А.Кудряшов, М.В.Трошкин. Российский федеральный ядерный центр – ВНИИЭФ, Россия, Нижегородская обл., 607188 Саров, просп. Мира, 37; e-mail: vyskub@otd13.vniief.ru

Поступила в редакцию 24 июня 2011 г., после доработки – 15 августа 2011 г.

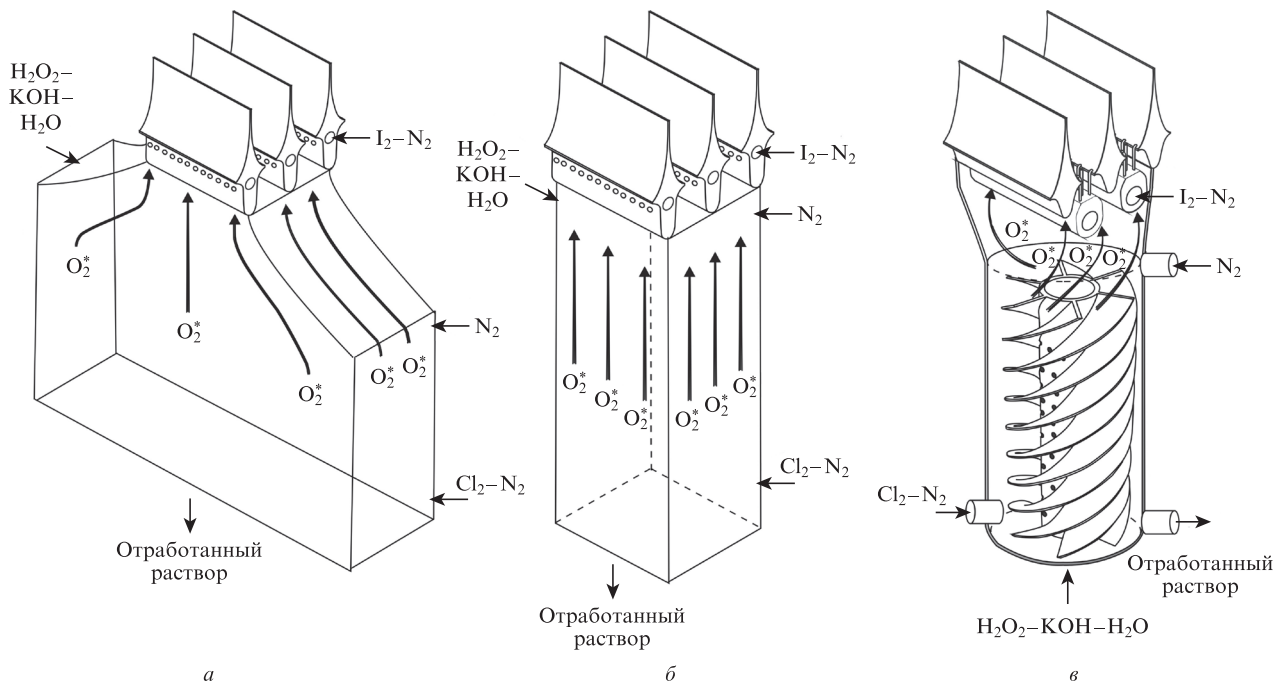


Рис.1. Возможные схемы организации газовых потоков в сверхзвуковом ХКИЛ при низкой (а) и высокой (б) скоростях газа в ГСК, а также при использовании ЗА ГСК (в).

ной схеме на рис.1,б. В этих условиях удельные энергетические характеристики, полученные в экспериментах на модели ХКИЛ с киловаттной мощностью, могут быть полностью перенесены на более масштабные устройства, что было подтверждено при модульном построении установки со средней выходной мощностью 50 кВт [1]. Как и ожидалось, лазерная эффективность на этой установке повысилась за счет более высокого КПД резонатора при больших длине усиления и протяженности резонатора по потоку.

### 3. Генератор синглетного кислорода с закрученным аэрозольным потоком газа

В экспериментах использовался ГСК, получивший в литературе название «генератор синглетного кислорода с закрученным аэрозольным потоком газа» (ЗА ГСК, или TA SOG) [8]. Ранее была продемонстрирована модель ЗА ГСК, обеспечивающая устойчивую работу с высокой эффективностью и выходом, свободным от аэрозоля, при скорости газа свыше 100 м/с [7]. Новая более производительная модель ЗА ГСК, использованная в настоящей работе, отличалась увеличенным (с 51 до 76 мм) диаметром реакционной зоны. Площадь сечения реактора в плоскости, перпендикулярной скорости газа, составляла 17.8 см<sup>2</sup>.

Эксперименты проводились по стандартной схеме [7], в которой перед входом в ГСК хлор смешивался с азотом в соотношении примерно 1:2, а для регулирования скорости газа в реакционной зоне изменялась площадь критического сечения сопла, установленного на выходе ГСК (12, 15 и 18 см<sup>2</sup>). Использовался щелочной раствор 35%-ной перекиси водорода с концентрацией щелочи [KOH] = 5 моль/л и расходом ~1.2 л/с. Изменение площади сечения выходного сопла и подмешивание в поток перед соплом второго буферного газа (азота) позволяло варьировать скорость газа в ЗА ГСК от 30 до 100 м/с и более.

Расходы хлора и буферных газов определялись общепринятым способом по измерению давлений на расходных шайбах с известным поперечным сечением. Концент-

рация синглетного кислорода (СК) O<sub>2</sub>(a<sup>1</sup>Δ) определялась с помощью фотометрической методики, основанной на измерении интенсивности спонтанного излучения в ИК полосе кислорода на длине волны λ = 1270 нм. Методика калибровки фотоприемника была аналогична изложенной в работе [9]. Утилизация хлора на выходе ЗА ГСК измерялась по поглощению излучения с λ = 365 нм в специальной кювете с погрешностью ~20% и составляла 84%–88%.

На рис.2 и 3 представлены некоторые характеристики новой модели ЗА ГСК, полученные в экспериментах. Наблюдаемое увеличение выхода СК (при одинаковых расходах хлора) с ростом скорости газа связано с уменьшением релаксационных потерь при его транспортировке. Все данные приведены для режимов, пригодных для лазерных экспериментов, когда выход ГСК свободен от аэрозоля.

В экспериментах продемонстрирована устойчивая работа ЗА ГСК при расходе хлора до 680 ммоль/с, давлении газа до 200 Тор и скорости газа до 100 м/с. Благодаря высоким скорости и плотности газа в ЗА ГСК достигнутая удельная производительность СК превышала

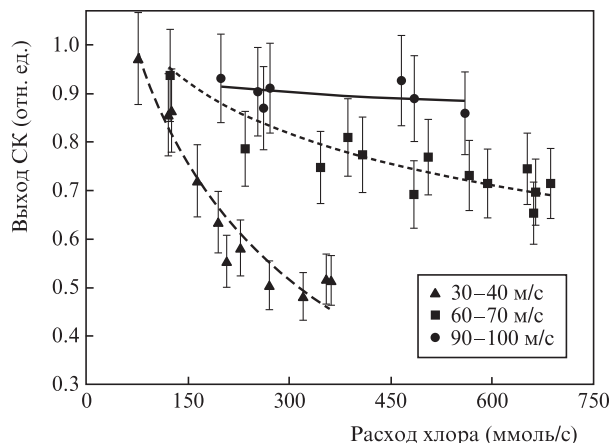


Рис.2. Зависимости выхода СК из ЗА ГСК от молярного расхода хлора при различных скоростях газа в реакторе.

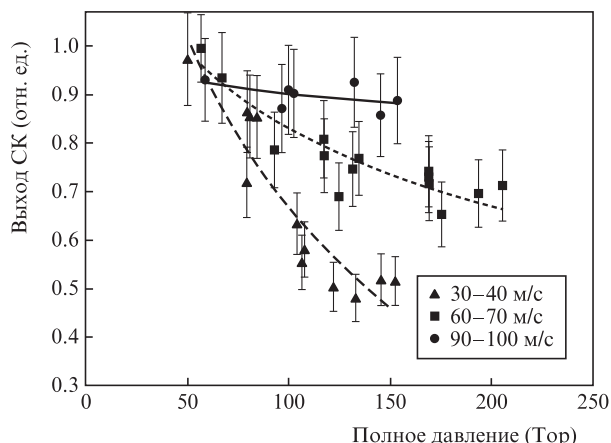


Рис.3. Зависимости выхода СК из ЗА ГСК от полного давления газа при различных скоростях газа в реакторе.

20 ммоль·с<sup>-1</sup>·см<sup>-2</sup> при его выходе ~70% (или 38 ммоль·с<sup>-1</sup>·см<sup>-2</sup> по хлору). Такими характеристиками не обладает ни один из известных в мире ГСК [6].

#### 4. Экспериментальное исследование энергетических характеристик ХКИЛ с ЗА ГСК

Исследование энергетических характеристик сверхзвукового ХКИЛ с новым модулем ЗА ГСК проводилось на испытательном стенде, общий вид которого во время проведения лазерного эксперимента показан на рис.4. Описание конструкции лазера представлено в наших предыдущих работах [10, 11].

Генерационные эксперименты проводились со сверхзвуковыми соплами шириной 15 см для трех значений высоты критического сечения: 8, 10 и 12 мм. Использовалась схема смешения эргонесущего (СК и азота) и излучающего (смеси паров иода и азота) газов в параллельных

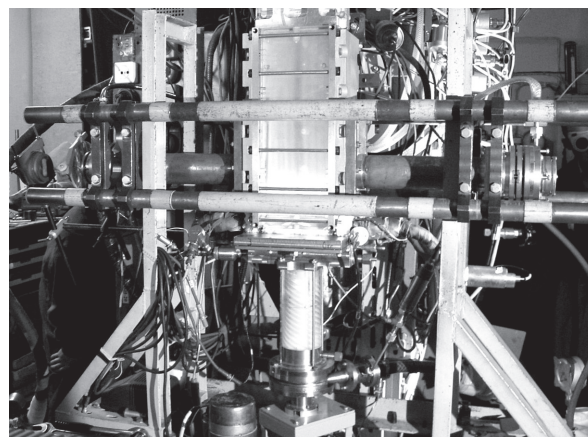


Рис.4. Фотография испытательного стенда во время проведения лазерного эксперимента.

потоках. Иод в смеси с азотом подавался через 9-рядный крыловидный трубчатый инжектор, расположенный в дозвуковой области основного потока (рис.1,б), в трансзвуковую область сопла на расстоянии 2 мм от критического сечения, где смешивался с газами, поступающими из ЗА ГСК. Такая схема обеспечивала минимальные газодинамические возмущения при смешении компонентов рабочей смеси газов, растянутую по потоку газа (до 15–20 см) активную лазерную среду и ранее превосходно зарекомендовала себя в смесевом газодинамическом лазере [12]. Применительно к ХКИЛ подобная схема смешения позволяет полностью предотвратить взаимодействие СК с иодом в области высоких плотностей газа и уменьшить потери СК при его транспортировке и смешении.

В экспериментах использовался устойчивый резонатор «плоскость–сфера» с коэффициентами отражения 99.5% и 96% для глухого и выходного зеркал соответственно. Оптический диаметр зеркал составлял 50 мм, радиус кри-

Табл.1. Результаты генерационных экспериментов.

$h^*$ (мм)	$M_{cold}$	$S_1^*$ (см <sup>2</sup> )	Расход хлора (моль/с)	Расход азота 1 (моль/с)	Расход азота 2 (моль/с)	Полный расход (моль/с)	$p_1$ (Тор)	$T_1$ (K)	Расход иода (моль/с)	Расход азота 3 (моль/с)	$p_2$ (Тор)	$T_2$ (K)	$p_{stat}$ (Тор)	$M_{res}$	$W$ (кВт)	$\eta_{chem}$ (%)
8	2.4	10.9	0.077	0.156	0.187	0.420	42	390	0.0040	0.019	120	380	3.8	2.3	1.15	16.5
			0.134	0.239	0.269	0.642	62	380	0.0039	0.018	117	380	5.8	2.2	1.31	10.8
			0.227	0.168	0.457	0.852	83	370	0.0039	0.018	117	380	–	–	2.30	11.3
			0.374	0.164	0	0.538	55	330	0.0039	0.019	122	390	–	–	3.88	11.5
			0.374	0.258	0	0.632	61	340	0.0041	0.019	123	380	5.3	2.3	3.80	11.3
10	2.2	13.9	0.078	0.165	0.178	0.421	33	370	0.0042	0.020	129	390	6.7	1.8	1.95	27.8
			0.126	0.254	0.252	0.632	46	370	0.0042	0.020	129	390	9	1.8	2.46	21.7
			0.212	0.178	0.446	0.836	63	360	0.0042	0.020	130	390	12.3	1.8	2.97	15.6
			0.344	0.325	0	0.669	51	330	0.0042	0.020	130	390	10	1.8	4.74	15.3
			0.347	0.326	0	0.673	51	330	0.0042	0.020	129	390	–	–	4.22	13.5
12	2.1	16.9	0.348	0.326	0.350	1.024	74	350	0.0042	0.020	128	390	–	–	4.48	14.3
			0.353	0.326	0.160	0.839	55	400	0.0046	0.020	134	380	–	–	5.42	17.1
			0.400	0.758	0.184	1.342	85	410	0.0038	0.017	129	380	–	–	6.02	16.7
			0.411	0.325	0.280	1.016	64	400	0.0046	0.021	134	380	–	–	5.39	14.6
			0.433	0.753	0.184	1.370	87	410	0.0038	0.017	124	380	–	–	5.90	15.1
12	2.1	16.9	0.436	0.470	0.176	1.082	70	400	0.0047	0.022	140	380	13.2	1.8	6.30	16.1
			0.470	0.760	0.184	1.414	90	410	0.0043	0.019	129	380	–	–	6.02	14.7
			0.483	0.639	0.265	1.387	88	410	0.0039	0.018	119	390	–	–	7.53	17.3

Примечания:  $h^*$  – высота критического сечения сопла;  $M_{cold}$  – число Маха сопла, вычисленное из его геометрических размеров для холодного азота;  $S_1^*$  – площадь критического сечения сопла (площадь критического сечения инжектора  $S_2^* = 0.59$  см<sup>2</sup>); азот 1 и 2 – буферные газы, азот 3 – газ-носитель иода;  $p_1$  и  $p_2$  – давления газа на входе в сопло и инжектор соответственно;  $T_1$  и  $T_2$  – температуры газа на входе в сопло и инжектор соответственно, вычисленные по измеренным значениям  $p_1$ ,  $p_2$ , расходов газов и площади поперечного сечения потока в месте измерения давлений;  $p_{stat}$  – статическое давление газа в резонаторе;  $M_{res}$  – число Маха газового потока в резонаторе, оцененное по изэнтропической формуле с использованием отношения  $p_{stat}$  к эффективному давлению торможения смеси основного и инжектируемого газов, вычисленного по модели мгновенного смешения;  $W$  и  $\eta_{chem}$  – мощность генерации и химическая эффективность ХКИЛ соответственно; прочерки в таблице означают, что соответствующие параметры не измерялись.

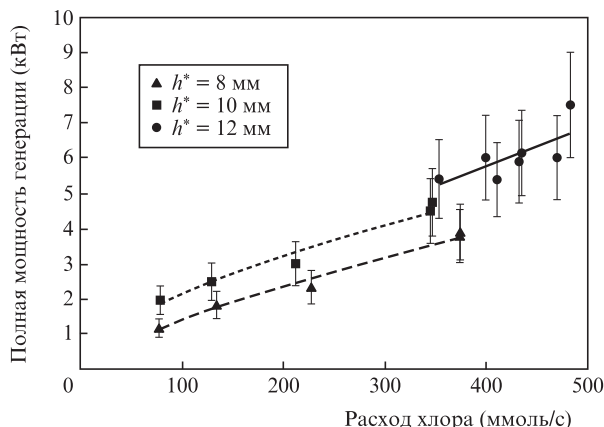


Рис.5. Зависимости полной мощности излучения сверхзвукового ХКИЛ от молярного расхода хлора при различных высотах  $h^*$  критического сечения сопла.

визны глухого зеркала – 10 м. Результаты проведенных экспериментов приведены в табл.1. Зависимости полной мощности генерации (сумма мощностей излучения, выходящего через оба зеркала резонатора) и химической эффективности лазера от расхода хлора для различных сопел представлены на рис.5 и 6.

При увеличении высоты критического сечения сопла возрастала скорость газа в ЗА ГСК и уменьшалось полное давление на входе в сопло, что приводило соответственно к увеличению эффективности ЗА ГСК и снижению релаксационных потерь СК. Увеличение мощности излучения лазера отвечало увеличению расхода хлора. Следует отметить, что во всех проведенных экспериментах использовался один и тот же трубчатый инжектор иода, разработанный ранее для сопла с высотой критического сечения 3.8 мм [10, 11]. С увеличением высоты до 8–12 мм приходилось увеличивать расстояние между выходными концами трубок инжектора, что ухудшало условия для смешения иода и СК и снижало эффективность лазера. Тем не менее максимальная мощность излучения и химическая эффективность ХКИЛ оказались достаточно высокими, хотя длина лазерного резонатора по потоку газа составляла только 50 мм.

Максимальная мощность генерации ХКИЛ была равна ~7.5 кВт при расходе хлора ~480 ммоль/с, скорости газа в реакторе ~100 м/с и его давлении на входе в сопло

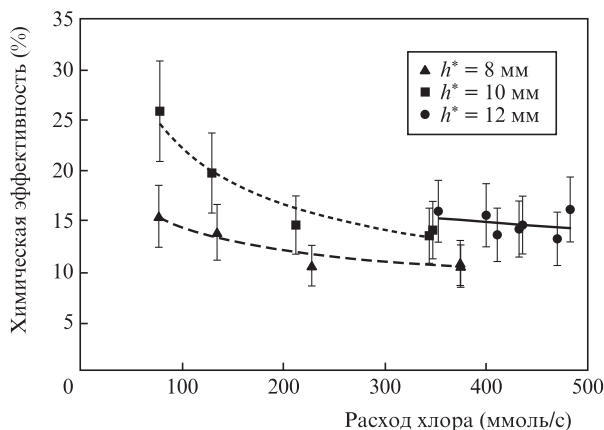


Рис.6. Зависимости химической эффективности сверхзвукового ХКИЛ от молярного расхода хлора при различных высотах  $h^*$  критического сечения сопла.

~90 Тор, что отвечает мощности, приведенной к площади поперечного сечения газового потока в резонаторе, примерно 230 Вт/см<sup>2</sup>. Максимальная химическая эффективность ХКИЛ составила ~30% при расходе хлора ~80 ммоль/с и давлении газа на входе в сопло ~35 Тор.

Мощность излучения ХКИЛ могла быть еще выше, если бы не происходило лучевого разрушения отражающего диэлектрического покрытия зеркал резонатора. Простейшие оценки показывают, что уже при выходной мощности лазера 4 кВт средняя интенсивность излучения, падающего на зеркала резонатора, составляла ~10 кВт/см<sup>2</sup>. Это означает, что в «горячих» точках интенсивность могла достигать 30–50 кВт/см<sup>2</sup>. Такие нагрузки диэлектрическое покрытие не выдерживало, поэтому в экспериментах при мощности излучения свыше 2.5–3 кВт отражающие диэлектрические покрытия зеркал резонатора частично разрушались.

## 5. Заключение

Таким образом, в настоящей работе обсуждена проблема масштабирования ХКИЛ. Показано, что удельную мощность и эффективность ХКИЛ при увеличении масштаба установки можно сохранить, если обеспечить скорость газа в реакционной зоне ГСК не менее 50–120 м/с. Представлена модель ЗА ГСК, отвечающая этим требованиям.

В экспериментах продемонстрирована устойчивая работа модели ЗА ГСК при расходе хлора до 680 ммоль/с, расходе щелочного раствора перекиси водорода 1.2 л/с, давлении газа до 200 Тор и скорости газа в реакторе до 100 м/с. Максимальная удельная производительность ЗА ГСК по СК составила более 20 ммоль·с<sup>-1</sup>·см<sup>-2</sup> при выходе СК примерно 70% (38 ммоль·с<sup>-1</sup>·см<sup>-2</sup> по хлору). Такими характеристиками не обладает ни один из известных в мире ГСК.

Проведены исследования энергетических характеристик сверхзвукового ХКИЛ совместно с ЗА ГСК. При давлении газа на входе в сопло ~90 Тор достигнута максимальная мощность излучения ХКИЛ ~7.5 кВт, отвечающая приведенной мощности излучения 230 Вт/см<sup>2</sup>. Максимальная химическая эффективность ХКИЛ составила ~30% при давлении газа на входе в сопло ~35 Тор.

1. Адаменков А.А., Бакшин В.В., Богачев А.В. и др. *Квантовая электроника*, **37** (7), 601 (2007).
2. Thayer W.J. *AIAA Paper* №94-2454 (1994).
3. Борейшо А.С., Мальков В.М., Савин А.В., Васильев Д.Н., Евдокимов И.М., Триллис А.В., Страхов С.Ю. *Квантовая электроника*, **33** (4), 307 (2003).
4. Fujii H., Atsuta T. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **3092**, 700 (1996).
5. Truesdell K.A., Helms C.A., Hager G.D. *AIAA Paper* №94-2421 (1994).
6. Hewett K.V. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **7131**, 71310I (2009).
7. Адаменков А.А., Выскубенко Б.А., Ильин С.П., Круковский И.М. *Квантовая электроника*, **32** (6), 490 (2002).
8. Wani F., Endo M., Vyskubenko B.A., Ilyin S.P., Krukovsky I.M., Takeda S., Fujioka T. *IEEE J. Quantum Electron.*, **34** (11), 2130 (1998).
9. Балан Н.Ф., Загидуллин М.В., Куров А.Ю., Николаев В.Д., Свистун М.И. *Письма в ЖТФ*, **15** (18), 64 (1989).
10. Vyskubenko B.A., Adamenkov A.A., Ilyin S.P., et al. *AIAA Paper* №3009-2001 (2001).
11. Vyskubenko B.A., Adamenkov A.A., Bakshin V.V., et al. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **5777**, 96 (2004).
12. Kolobyanin Yu.V., Vyskubenko B.A., Adamenkov A.A., et al. *Proc. Int. Conf. on Lasers'96* (McLean, VA: STS Press, 1997, p. 175).