

Предварительное исследование генератора синглетного кислорода с центробежным потоком*

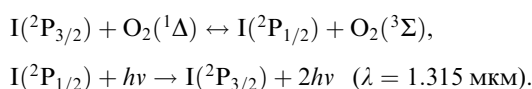
Венбо Ши, Лиженг Денг, Хепинг Янг, Гуохе Ша, Куньхао Жанг

Разработан и создан новый тип генератора синглетного кислорода с центробежным потоком. При его разработке использовалась выдвинутая Эмануэлем идея гравитационно-независимого генератора синглетного кислорода (ГСК) высокого давления, в основе которого лежит действие на частицы движущейся по окружности жидкой среды огро-мной центробежной силы. В нашем устройстве в результате реакции газообразного Cl_2 с движущимся по окружности потоком раствора основной перекиси водорода (ОПВ) генерировался $O_2(^1\Delta)$, который затем быстро удалялся из жидкой фазы ОПВ под действием центробежной силы. В то же время микрокапли, формирующиеся во время реакции $Cl_2 + ОПВ$, удалялись из газового потока $O_2(^1\Delta)$ под действием центробежной силы, вызванной высокой скоростью перемещения потока вдоль дугообразной направляющей. Предварительные исследования показали, что благодаря значительно большей удельной площади поверхности реакции в новом типе ГСК по сравнению со струйным ГСК, который обычно используется в современных химических кислородно-иодных лазерах, выход $O_2(^1\Delta)$ достиг $\sim 60\%$, парциальное давление $O_2(^1\Delta)$ составило 31 Тор, а коэффициент использования хлора превысил 96%. Был получен устойчивый режим генерации $O_2(^1\Delta)$.

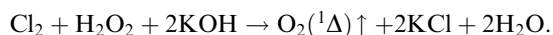
Ключевые слова: химический лазер, генератор синглетного кислорода, основная перекись водорода, химический кислородно-иодный лазер.

1. Введение

Благодаря таким преимуществам, как генерация на длине волны $\lambda = 1.315$ мкм и возможность увеличения выходной мощности путем простого масштабирования, химический кислородно-иодный лазер (ХКИЛ) является перспективным лазерным устройством для множества применений. Накачка верхнего рабочего уровня этого лазера происходит при квазирезонансной передаче энергии синглетного кислорода $O_2(^1\Delta)$ к атому иода I [1]:



Синглетный кислород $O_2(^1\Delta)$ образуется в результате реакции газообразного хлора с раствором основной перекиси водорода (ОПВ):



Эта реакция происходит в генераторе синглетного кислорода (ГСК). Таким образом, создание высокоэффективных ГСК является ключевым моментом в процессе совершенствования ХКИЛ.

ГСК, представляющий собой технически законченное устройство, в то же время может быть составной частью сверхзвукового ХКИЛ. Существуют четыре типа ГСК.

* Перевод с англ. В.В.Кошечкиной.

Wenbo Shi, Liezheng Deng, Heping Yang, Guohe Sha, Cunhao Zhang. State Key Laboratory of Molecular Reaction Dynamics, Dalian Institute of Chemical Physics, Chinese Academy of Sciences, 457 Zhong Shan Road, Dalian 116023, P. R. China; web-site: http://www.dicp.ac.cn/, e-mail: ghsha@dicp.ac.cn

Поступила в редакцию 19 апреля 2007 г.

1. В ГСК на вращающихся дисках [2] имеется набор соосных круглых дисков, нижние половины которых погружены в раствор ОПВ. При вращении дисков на их верхних частях формируется свежая пленка ОПВ. Для получения $O_2(^1\Delta)$ смесь Cl_2 и He пропускается через зазоры между дисками и взаимодействует с пленкой ОПВ. В типичных ГСК на вращающихся дисках можно получить выход синглетного кислорода $Y_\Delta \approx 52\%$ и его парциальное давление $p_\Delta \sim 6$ Тор при отношении концентраций Cl_2 и He, равном 1/3, и полном давлении 48.7 Тор [2].

2. Струйный ГСК [3], в котором для взаимодействия с хлором ОПВ впрыскивается в его поток в виде непрерывных струй, проходя через сопла в пластине. Типичные характеристики генератора таковы $Y_\Delta \sim 65\%$, коэффициент использования хлора $U_{Cl_2} \sim 90\%$ и парциальное давление синглетного кислорода $p_\Delta \sim 12$ Тор при общем давлении 20 Тор [3] (без буферного газа). Лучших характеристик можно достичь при очень жестких условиях. Например, в работе [4] сообщалось о получении $Y_\Delta \sim 60\%$ и $U_{Cl_2} \sim 80\%$ при полном давлении ~ 100 Тор (без буферного газа). По оценкам, парциальное давление $O_2(^1\Delta)$ могло достигать 48 Тор.

3. Равномерно-капельный ГСК [5] на самом деле является модификацией струйного ГСК, в котором для увеличения удельной площади поверхности реакции (т. е. площади контакта Cl_2 с ОПВ в единичном объеме) посредством внешнего воздействия струя расщепляется на последовательность капель. Однако это не приводит к значительному увеличению эффективности по сравнению с эффективностью струйного ГСК, поскольку в этом случае в сток лазерной кюветы уносится большее количество ОПВ (в виде мельчайших капель), чем в случае струи, что существенно ухудшает параметры устройства.

4. Спиральный аэрозольный ГСК [6], в котором распылителем служит трубка с рядами отверстий, просвер-

ленных ортогонально ее стенке, а внешняя стенка трубки снабжена набором параллельных спиральных лопаток, которые вместе с цилиндрическим кожухом трубки формируют область реакции спиральной формы. ОПВ впрыскивается в зону реакции через вращающийся распылитель для формирования капельной струи и взаимодействует с Cl_2 , затем облако/капли ОПВ отделяются от газового потока $\text{O}_2(^1\Delta)$ центробежной силой. В ГСК этого типа Выскубенко и соавторы [7] получили выход синглетного кислорода $Y_\Delta = 50\%$ и его парциальное давление $p_\Delta = 75$ Тор. При использовании данного типа ГСК в сверхзвуковом ХКИЛ парциальное давление $\text{O}_2(^1\Delta)$ на выходе сверхзвукового сопла достигало 22.5 Тор, что, по мнению авторов [7], являлось рекордным достижением.

Экспериментально и теоретически было показано, что ключевым моментом в улучшении качества ГСК является максимальное увеличение удельной площади поверхности реакции при поддержании устойчивой работы ГСК. В последнее время основная тенденция при разработке высокоэффективных ГСК заключается в использовании центробежной силы для облегчения разделения газа и жидкости при одновременном повышении стабильности работы.

К настоящему времени исследованы следующие типы центробежных ГСК.

1. Спиральный аэрозольный генератор, аналогичный описанному выше.

2. Центробежный пузырьковый ГСК [8–10], где вращающийся цилиндр используется для создания центробежного ускорения, которое легко может достигать нескольких сотен g (где g – ускорение свободного падения). Газообразный Cl_2 поступает через небольшие отверстия для взаимодействия со слоем ОПВ, расположенным на внутренней стенке цилиндра, после чего генерирующиеся пузырьки $\text{O}_2(^1\Delta)$ быстро отделяются от слоя жидкой ОПВ под действием большой выталкивающей силы, возникающей в результате центробежного ускорения. Используя этот тип ГСК, Загидуллин и соавторы [9, 10] получили мощности лазерного излучения 770 и 1264 Вт при химической эффективности 25.6% и 24.6% и центробежном ускорении 136g [9] и 400g [10] соответственно.

3. Центробежный аэрозольный ГСК [8, 11], для которого характерно наличие в реакционном сосуде вращающегося газо-жидкостного сепаратора с радиальными спиральными лопастями. Аэрозоль ОПВ формируется, когда ОПВ и Cl_2 одновременно впрыскиваются в сосуд через распылитель особой конструкции. Использованный аэрозоль ОПВ отделяется от газового потока $\text{O}_2(^1\Delta)$ быстро вращающимися лопастями, которые направляют поток ОПВ от центра к периферии сосуда. Предварительные эксперименты с этим типом ГСК показали, что, когда производство коэффициента использования хлора и выхода $\text{O}_2(^1\Delta)$ составило 0.45, перед отделением аэрозоля ОПВ от газового потока было получено давление $\text{O}_2(^1\Delta)$ примерно 40 Тор [11].

Очевидный недостаток такого центробежного ГСК состоит в том, что вращающиеся механические части значительно усложняют конструкцию ГСК и затрудняют его производство в промышленных масштабах. В 2004 г. Эмануэль [12] предложил другой тип центробежного ГСК, без вращающихся частей, основанный только на движущемся по участку окружности (вращающемся) жидком потоке. В этом ГСК для формирования вращающегося слоя жидкости перекись водорода быстро впры-

скивается в полость с дугообразной направляющей через сужающееся щелевое сопло, в то время как Cl_2 подводится к потоку через стенку из пористой нержавеющей стали, расположенную чуть ниже по потоку от сопла для впрыскивания ОПВ. При смешивании с Cl_2 слой жидкой ОПВ переходит в слой пены, которая состоит из пузырьков микронного размера с удельной площадью поверхности, на порядки большей, чем в существующих ГСК. В то же время вращающийся поток жидкости порождает значительную центробежную силу, которая позволяет пузырькам $\text{O}_2(^1\Delta)$ быстро покидать поток ОПВ. Взяв за основу идею Эмануэля, мы разработали и создали новый тип центробежного ГСК, в котором используются оба вращающихся потока – потоки жидкости и газа. Для удобства здесь и далее он называется генератором синглетного кислорода с центробежным потоком (ГСКЦП). Ниже представлены детальные предварительные исследования этого ГСКЦП.

2. Эксперименты и полученные результаты

Схема экспериментальной установки показана на рис. 1. ГСКЦП выполнен из плексигласа. В верхней части реакционной емкости расположено прямоугольное щелевое сопло 1 размером 10×3 мм. Через него впрыскивается ОПВ, которая формирует жидкий слой, распространяющийся по дугообразной направляющей 4. Эта направляющая имеет ширину 13 мм и радиус кривизны 45 мм и изготовлена из тефлона для уменьшения трения. Пластина 2 для впрыскивания Cl_2 выполнена из

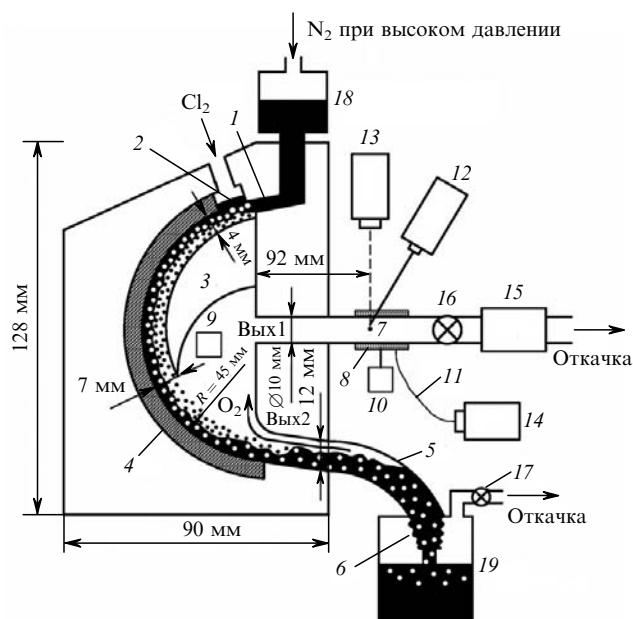


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:

1 – щелевое сопло для впрыскивания ОПВ размером 10×3 мм; 2 – пластина для впрыскивания Cl_2 , выполненная из пористого плексигласа; 3 – полусферовидный блок; 4 – дугообразная направляющая; 5 – трубка для стока ОПВ; 6 – тонкостенная эластичная резиновая трубка; 7 – диагностическая ячейка; 8 – кварцевое окно; 9, 10 – манометры; 11 – оптоволоконно; 12 – YAG-лазер с удвоением частоты (532 нм); 13 – спектрограф на основе ПЗС-камеры с усилением; 14 – спектрограф на основе ПЗС-камеры; 15 – система контроля использования Cl_2 ; 16, 17 – клапаны; 18 – емкость высокого давления с ОПВ; 19 – накопительный бак для ОПВ; Вых1 – выход для газового потока $\text{O}_2(^1\Delta)$; Вых2 – выход для потока ОПВ.

плексигласа и имеет ширину 10 мм, радиус кривизны 45 мм и длину дуги 12 мм. Она расположена между щелевым соплом 1 и дугообразной направляющей 4. В пластине из плексигласа просверлено четыреста отверстий диаметром $D = 0.3$ мм. В конце дугообразной направляющей 4 расположен канал для отвода ОПВ размером 13×12 мм (Вых2), через который ОПВ проходит в сток 5 и по нему в накопительный бак. На выходе к стоку 5 подсоединена тонкостенная эластичная резиновая трубка 6, которая служит «контрольным клапаном» для надежной изоляции реакционного сосуда от накопительного бака для ОПВ. Канал для отвода газового потока $O_2(^1\Delta)$ (Вых1) находится в средней части реакционного сосуда, а съемный полусферовидный блок из плексигласа 3 установлен напротив дугообразной направляющей 4. Диагностическая ячейка 7 и канал для отвода $O_2(^1\Delta)$ расположены на расстоянии 92 мм друг от друга и соединены плексигласовой трубкой диаметром 10 мм. Манометры 9 и 10 предназначены для измерения давлений в реакционной емкости (p_v) и диагностической ячейке (p_w) соответственно.

Система регистрации $O_2(^1\Delta)$, состоящая из YAG-лазера с удвоением частоты (532 нм) 12 и спектрографа 13, измеряет выход $O_2(^1\Delta)$ методом спонтанного комбинационного рассеяния [13]. В наших экспериментах относительная погрешность этого метода составила примерно 9%. К окну 8 подсоединяется оптоволокно 11 для передачи излучения из диагностической ячейки 7 на вход спектрографа 14, с помощью которого определялось содержание паров воды путем измерения отношения интенсивностей кооперативного (димольного) излучения $O_2(^1\Delta)$ на $\lambda = 634$ нм и спонтанного излучения $O_2(^1\Sigma)$ на $\lambda = 762$ нм (см. ниже рис.4) [14]. Ниже по потоку за диагностической ячейкой расположена система контроля использования хлора 15, с помощью которой определялся коэффициент использования хлора по спектру поглощения Cl_2 в УФ диапазоне [15]. В наших экспериментах относительная погрешность измерения с помощью этой системы составила менее 5%.

ОПВ была приготовлена из 7 л H_2O_2 и 10 кг водного раствора КОН с массовыми концентрациями 50% и хранилась при температуре примерно $-14^\circ C$. Под действием давления газообразного азота в 7 атм на выходе щелевого сопла 1 формировался вращающийся поток ОПВ с расходом $225 \text{ см}^3/\text{с}$. Скорость потока хлора F_{Cl_2} контролировалась трубками Вентури различного диаметра, предварительно откалиброванными по N_2 . Давления p_v и p_w , измеряемые манометрами в реакционной емкости и диагностической ячейке, могли контролироваться с помощью клапанов 16 и 17. Управление ГСК и сбор данных выполнялись автоматически с использованием персонального компьютера. Каждый рабочий цикл длился примерно 70 с, и ОПВ в накопительной емкости можно было использовать повторно, поскольку в каждом цикле реально расходовалась только малая часть ОПВ.

В соответствии с работой [12] наш первый ГСКЦП был сконструирован без полусферовидного блока. Как оказалось, это было ошибкой, поскольку обильная пена попадала из пластины для впрыскивания хлора 2 в канал для отвода газа (Вых1) и число мелких капель возрастало по мере роста скорости потока хлора. Сигналы комбинационного рассеяния $O_2(^1\Delta)$ и $O_2(^3\Sigma)$ полностью подавлялись сигналом рассеянного на аэрозоле света.

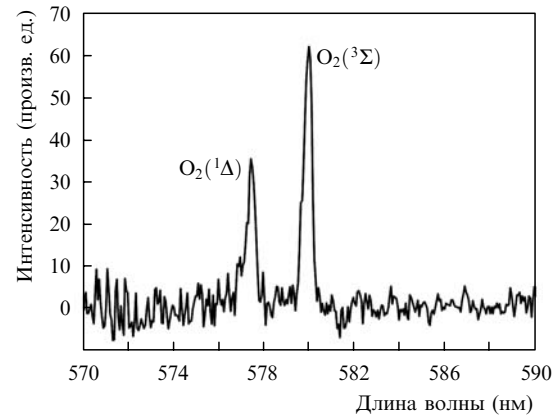


Рис.2. Комбинационный спектр $O_2(^1\Delta)$ и $O_2(^3\Sigma)$, полученный в диагностической ячейке в условиях эксперимента 2 (см. табл.1).

Таким образом, в этом случае метод спонтанного комбинационного рассеяния не позволял измерить выход $O_2(^1\Delta)$. Для устранения аэрозоля перед каналом для отвода газа (Вых1) был помещен полусферовидный плексигласовый блок 3. После этого отношение сигнал/шум в комбинационном спектре значительно возросло. На рис.2 показан полученный после установки полусферовидного блока спектр комбинационного рассеяния кислорода, который свидетельствует об эффективной блокировке аэрозоля.

После решения проблемы аэрозоля мы приступили к исследованиям характеристик ГСКЦП. На рис.3 показаны давление в диагностической ячейке и коэффициент использования хлора за рабочий цикл. В первые ~ 20 с подготовительной фазы I была записана нулевая линия сигнала поглощения Cl_2 в условиях, когда ни ОПВ, ни Cl_2 в ГСКЦП не поступали (этот сигнал соответствовал коэффициенту использования хлора $U_{Cl_2} = 100\%$). В фазе II в ГСКЦП одновременно поступали ОПВ и Cl_2 . В течение нескольких секунд был получен стабильный режим работы (фаза III), когда были зарегистрированы комбинационный спектр $O_2(^1\Delta)$ (рис.2) и спектр излучения (рис.4), которые дают усредненный выход $O_2(^1\Delta)$ и парциальное давление воды p_{H_2O} в диагностической ячейке в фазе III. Коэффициент использования хлора U_{Cl_2} был получен из

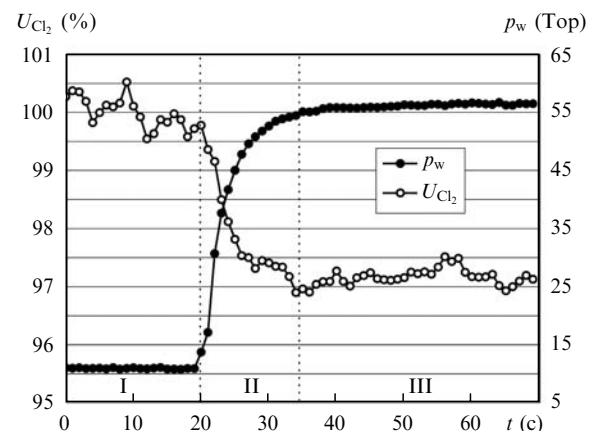


Рис.3. Давление в диагностической ячейке p_w и коэффициент использования хлора U_{Cl_2} во время рабочего цикла ГСКЦП в условиях эксперимента 2 (см. табл.1). Фаза I — подготовительная стадия работы ГСК; фаза II — переход от впрыскивания Cl_2 к установлению стационарного режима; фаза III — стационарный режим работы ГСК.

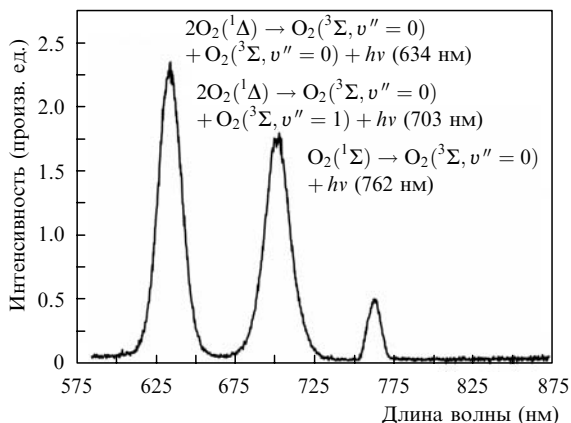


Рис.4. Спектр излучения $O_2(^1\Delta)$ и $O_2(^1\Sigma)$, полученный в диагностической ячейке в условиях эксперимента 2 (см. табл.1).

отношения сигнала поглощения хлора к среднему значению сигнала поглощения в фазе I. В наших экспериментах хлор практически всегда использовался полностью, т. е. значение U_{Cl_2} приближалось к 100 %.

В табл.1 приведены экспериментальные параметры ГСКЦП для различных значений F_{Cl_2} , p_v и p_w . Видно, что лучшее сочетание параметров в диагностической ячейке получено в эксперименте 2: $Y_\Delta = 59\%$, $U_{Cl_2} = 97\%$, $p_\Delta = 30.8$ Тор. Из сравнения с типичными данными для струйного ГСК [3] ($Y_\Delta \approx 65\%$, $U_{Cl_2} \approx 90\%$, $p_\Delta \approx 12$ Тор) следует, что ГСКЦП превосходит струйный ГСК как по коэффициенту использования хлора U_{Cl_2} , так и по давлению p_Δ . Наиболее значительное преимущество ГСКЦП – это чрезвычайно высокий коэффициент использования Cl_2 . Во всех экспериментах он составляет $\sim 96\%$. Выход синглетного кислорода Y_Δ уменьшается до $\sim 50\%$, когда F_{Cl_2} достигает 19.7 ммоль/с, и резко падает до $\sim 31\%$, когда F_{Cl_2} увеличивается до 36.6 ммоль/с. Очевидно, что существенные потери $O_2(^1\Delta)$ связаны с его быстрым тушением как на границе раздела газ – ОПВ, так и в газовой фазе из-за реакции «пулинга».

Табл.1. Экспериментальные параметры ГСКЦП для различных значений F_{Cl_2} , p_v и p_w .

Номер эксперимента	F_{Cl_2} (ммоль/с)	p_v (Тор)	p_w (Тор)	p_{H_2O} (Тор)	U_{Cl_2} (%)	Y_Δ (%)	p_Δ (Тор)	X_{H_2O} (%)
1	6.9	42.6	40.5	0.92	98.5	58.9	23.0	2.3
2	13.2	60.8	55.2	1.5	97.2	59.0	30.8	2.7
3	19.7	69.6	59.2	1.75	96.5	49.9	27.7	3.0
4	36.6	110.3	83.0	4.0	96.0	30.7	23.3	4.8

Примечания: $p_\Delta = (p_w - p_{H_2O})U_{Cl_2}$; $X_{H_2O} = (p_{H_2O}/p_w)100\%$.

Во всех экспериментах мы наблюдали постепенное формирование слоя пены ОПВ и его распространение вдоль боковых стенок канала для отвода ОПВ (Вых2) по мере возрастания скорости потока хлора F_{Cl_2} . Как только слой пены приближался к каналу для отвода газа (Вых1), его затягивало туда, и стабильная работа ГСКЦП была нарушена. Мы полагаем, что эта проблема связана с тем, что поперечное сечение отводной трубы недостаточно велико для того, чтобы обеспечить свободное прохождение пены ОПВ. В то же время газовый поток O_2 отделялся от пены в трубе и приносил на выход (Вых1) множество маленьких жидких капель.

3. Обсуждение

3.1. Удельная площадь поверхности реакции в ГСКЦП

Пусть поток ОПВ вдоль дугообразной направляющей 4 (рис.1) с радиусом кривизны R характеризуется линейной скоростью $u_{ВНР}$, тогда центробежное ускорение $a = u_{ВНР}^2/R$. Хлор попадает в поток жидкой ОПВ через отверстия диаметром $D = 0.3$ мм и формирует пузырьки. Затем, когда выталкивающая сила превышает силу поверхностного натяжения ОПВ на границе отверстий, сформированные пузырьки отсоединяются от них. Согласно [16] выражение для диаметра пузырька d можно записать в виде

$$d = \left[\frac{6D\sigma_{surf}}{(\rho_{ВНР} - \rho_{Cl_2})a} \right]^{1/3}, \quad (1)$$

где $\rho_{ВНР}$ и ρ_{Cl_2} – плотности ОПВ и Cl_2 соответственно; σ_{surf} – сила поверхностного натяжения. Можно положить $\sigma_{surf} \approx 80$ дин/см, что соответствует поверхностному натяжению водного раствора КОН с массовой концентрацией 18 % [17], $\rho_{ВНР} = 1.28$ г/см³, $u_{ВНР} \approx 7.5$ м/с, $R = 45$ мм. Подставляя эти значения в уравнение (1), получаем диаметр пузырька $d \approx 0.45$ мм. Удельная площадь поверхности реакции σ_{spec} для пузырька диаметром d может быть вычислена по формуле

$$\sigma_{spec} = \frac{\pi d^2}{\pi d^3/6} = \frac{6}{d}. \quad (2)$$

Таким образом, $\sigma_{spec} \approx 133$ см⁻¹, что в 20 раз больше, чем в струйном ГСК.

Согласно уравнению (1) диаметр пузырька d увеличивается при увеличении диаметра D входного отверстия для Cl_2 . В наших экспериментах мы пробовали использовать для впрыскивания Cl_2 пластину из пористого стекла или из нержавеющей стали с отверстиями диаметром $D \sim 0.03$ мм. В этом случае $d \approx 0.2$ мм и, согласно уравнению (2), $\sigma_{spec} \approx 300$ см⁻¹. Однако по сравнению с экспериментами, в которых диаметр входного отверстия для Cl_2 был равен 0.3 мм, мы не заметили дальнейшего увеличения коэффициента использования хлора U_{Cl_2} – в обоих случаях он превышал 96 %. Мы также выяснили, что пористое стекло или нержавеющая сталь быстро разъедаются смесью ОПВ и Cl_2 и выходят из строя буквально через несколько рабочих циклов ГСКЦП.

3.2. Назначение полусерповидного блока из плексигласа

Как было отмечено в разд.2, полусерповидный блок 3 (рис.1) из плексигласа был установлен напротив дугообразной направляющей 4. Одна из функций этой направляющей заключается в предотвращении попадания жидких капель (тумана) из потока непосредственно в канал для отвода газа (Вых1). Обозначим объемную скорость потока из одного отверстия через v . Тогда необходимое для формирования пузырька диаметром d время $t = (1/6)\pi d^3/v$. По мере роста пузырька он сносится потоком ОПВ со скоростью $u_{ВНР}$ и переносится за время t на расстояние $tu_{ВНР}$. Если $tu_{ВНР} \leq d$, то следующий пузырек сливается с предыдущим и образуется газовый канал, вдоль которого Cl_2 вырывается из слоя ОПВ и форми-

рует аэрозоль. Таким образом, для каждого отверстия существуют критическая объемная скорость газового потока $v_{cr} = (1/6)u_{ВНР}\pi d^2$ и критическая скорость потока $F_{cr} = Np_v v_{cr}/(R_g T)$, где N – число отверстий; T – температура; R_g – газовая постоянная. В наших экспериментах $N = 400$, $u_{ВНР} = 7.5$ м/с, $d = 0.45$ мм, что при $p_v \approx 110$ Тор и $T \approx 298$ К дает $F_{cr} \approx 1.9$ ммоль/с. Во всех наших экспериментах скорость потока хлора F_{Cl_2} больше F_{cr} . Таким образом, аэрозоли образуются во всех случаях.

Другая важная функция полусерповидного блока заключается в удалении аэрозоля из газового потока под действием центробежной силы, когда газ быстро перемещается вдоль дугообразного канала, аналогично тому, как это происходит в циклонном сепараторе в химической промышленности [18]. Оценим минимальный диаметр аэрозольной частицы, которую можно удалить в таком дугообразном канале. Предположим, что частица аэрозоля диаметром δ перемещается с тангенциальной скоростью u_g , тогда уравнение тангенциального перемещения частицы можно записать в виде [18]

$$\frac{dr}{dt} = \frac{\rho_{ВНР}\delta^2}{18\mu_{O_2}} \frac{u_g^2}{r}, \quad (3)$$

где $\mu_{O_2} \approx 2 \times 10^{-4}$ г·см⁻¹·с⁻¹ [19] – вязкость O₂; r – расстояние между аэрозольной частицей и центром дугообразного канала. Интегрируя уравнение (3), получаем время Δt , необходимое частице аэрозоля, чтобы переместиться от точки r_1 до точки r_2 :

$$\Delta t = \frac{18\mu_{O_2}}{\rho_{ВНР}\delta^2} \int_{r_1}^{r_2} \frac{r dr}{(r\omega)^2} = \frac{18\mu_{O_2}}{\rho_{ВНР}\omega^2\delta^2} \ln \frac{r_2}{r_1}. \quad (4)$$

Здесь ω – угловая скорость газа, т. е. $u_g = r\omega$. Рассматривая в качестве примера условия эксперимента 2 (см. табл.1), при длине дугообразного канала ~ 8 см, его радиусе ~ 42 мм, поперечном сечении 13×7 мм и поперечном сечении жидкого слоя 10×3 мм получаем поперечное сечение газового канала 61 мм², скорость газа $u_g \approx 67$ м/с, угловую скорость $\omega \approx 1600$ рад/с и $\Delta t \approx 1.2$ мс. В нашем ГСКЦП для удаления аэрозоля необходимо, чтобы частица перемещалась от точки $r_1 = 38$ мм до точки $r_2 = 45$ мм за время Δt . Таким образом, из уравнения (4) следует, что минимальный размер аэрозольной частицы, которая может быть удалена, составляет ~ 4 мкм.

4. Заключение

Таким образом, разработан и сконструирован новый тип генератора синглетного кислорода – ГСК с центробежным потоком, основанный на том, что во вращающейся жидкости на частицы действует огромная центробежная сила. В данном ГСК синглетный кислород генерировался в результате реакции газообразного Cl₂ с вращающимся потоком жидкой ОПВ и затем быстро удалялся из жидкой фазы ОПВ за счет огромной центробежной силы ($\sim 128g$). Кроме того, большая часть аэро-

золь, получающегося в результате интенсивной реакции Cl₂ + ОПВ с выделением тепла, может быть удалена из высокоскоростного газового потока O₂(¹Δ) в дугообразном канале под действием центробежной силы. Приблизительные оценки показали, что удельная площадь поверхности реакции в ГСКЦП оказалась существенно большей, чем в струйном ГСК. В этом ГСКЦП была достигнута значительно большая эффективность: выход O₂(¹Δ) составил ~ 60 %, парциальное давление O₂(¹Δ) было равно ~ 31 Тор и коэффициент использования хлора превысил 96 %.

Существуют возможности дальнейшего совершенствования ГСКЦП за счет как улучшения его конструкции, так и оптимизации его рабочих параметров. Сейчас такие работы ведутся.

Настоящая работа была выполнена при поддержке программы 973 (G1999075303) и Инновационной программы знаний Китайской академии наук (D1CP K2000E4).

1. Qi Zhuang, Fengting Sang, Dazheng Zhou. *Short Wavelength Chemical Lasers* (Beijing: National Defense Industrial Press, 1997) (in Chinese).
2. Kendrick K.R., Helms C.A., Quillen B.G. *IEEE J. Quantum Electron.*, **35**, 1759 (1999).
3. Stephen C.H. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **4631**, 101 (2002).
4. Аязов В.Н., Загидуллин М.В., Николаев В.Д., Свистун М.И., Хватов Н.А. *Квантовая электроника*, **21**, 129 (1994).
5. Thayer III W.J., Fisher C.H. *AIAA Paper No. 94-2454* (1994).
6. Wani Fumio, Endo Masamori, Vyskubenko B.A., Ilyin S.P., Krukovsky I.M., Takeda Shuzaburo, Fujioka Tomoo. *IEEE J. Quantum Electron.*, **34**, 2130 (1998).
7. Vyskubenko B.A., Adamenkov A.A., Deryugin Yu.N., Ilyin S.P., Kolobyanin Yu.V., Krukovsky I.M., Kudryashov E.A. *AIAA Paper No. 2001-3009* (2001).
8. Kodymová Jarmila, Hrubý Jan, Špalek Otomar, Jirásek Vit, Čenský Miroslav, Zagidullin M.V., Nikolaev V.D., Svistun M.I., Khvatov N.A., Hager G.D. *AIAA Paper No. 2005-5166* (2005).
9. Nikolaev V.D., Svistun M.I., Zagidullin M.V., Hager G.D. *Appl. Phys. Lett.*, **86**, 231102 (2005).
10. Загидуллин М.В., Николаев В.Д., Свистун М.И., Хватов Н.А. *Квантовая электроника*, **35**, 907 (2005).
11. Kodymová Jarmila, Špalek Otomar, Jirásek Vit, Čenský Miroslav, Hrubý Jan. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **6261**, 62611S (2006).
12. Emanuel G. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **5448**, 233 (2004).
13. Gylys V.T., Rubin L.F. *Appl. Opt.*, **37**, 1026 (1998).
14. Tokuda T., Fujii N., Yoshida S., Sawano T., Shimizu K., Tanaka I. *J. Appl. Phys.*, **68**, 6428 (1990).
15. Deng Lie-zheng, Shi Wen-bo, Wang Xiang-dan, Yang He-ping, Sha Guo-he. *Chinese J. Quantum Electron.*, **22**, 844 (2005) (in Chinese).
16. Рамм Б.М. *Абсорбционные процессы в химической промышленности* (М. – Л.: Госхимиздат, 1951).
17. Weast R.C. (Ed.) *CRC Handbook of Chemistry and Physics* (Boca Raton, Florida: CRC Press, Inc., 1990).
18. Shi Mingxian, Wang Yuning, Liu Junren, Ying Xietang, Shi Congnan, Lao Jiaren. *Chemical Engineering Handbook* (Beijing: Chemical Industrial Press, 1989, Vol. 21) (in Chinese).
19. Liu Guangqi, Ma Lianxiang, Liu Jie. *Chemistry and Chemical Engineering Physical Properties Data Handbook* (Beijing: Chemical Industrial Press, 2002) (in Chinese).