

## УСТАНОВКА ДЛЯ БЫСТРОГО И БЕЗОПАСНОГО ПРИГОТОВЛЕНИЯ РАБОЧИХ СМЕСЕЙ В РЕАКТОРАХ ИМПУЛЬСНЫХ ХИМИЧЕСКИХ HF(DF)-ЛАЗЕРОВ

© 2019 г. В. Я. Агроскин, Б. Г. Бравый, Г. К. Васильев, В. И. Гурьев, С. А. Каштанов, Е. Ф. Макаров\*, С. А. Сотниченко, Ю. А. Чернышев\*\*

*Институт проблем химической физики РАН  
Россия, 142432, Черноголовка, Московской обл., ул. Академика Семенова, 1*

*\* e-mail: makarov@icp.ac.ru*

*\*\* e-mail: chern@icp.ac.ru*

Поступила в редакцию 21.03.2018 г.

После доработки 21.03.2018 г.

Принята к публикации 15.04.2018 г.

Описана система для приготовления рабочих смесей в реакторах импульсных химических лазеров на основе реакций  $F_2 + H_2(D_2)$ . Разработана конструкция компактного капиллярного смесителя с достигнутой в экспериментах пропускной способностью до  $2 \text{ л} \cdot \text{атм/с}$ . Предложена схема напуска газов с использованием расходных шайб с отверстиями, работающими в критическом режиме, которая обеспечивает постоянство расхода смешиваемых газов в течение всего напуска. Теоретически проанализирована и экспериментально осуществлена описанная технология приготовления рабочих смесей импульсных химических HF(DF)-лазеров.

DOI: 10.1134/S0032816218060010

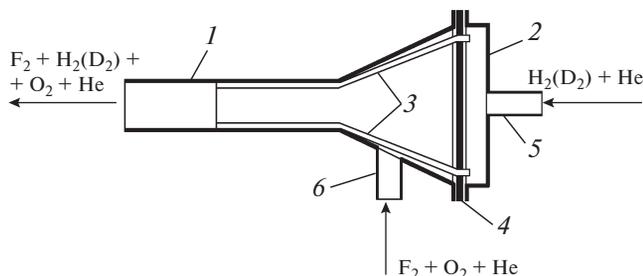
Многолетний опыт работы с мощными импульсными химическими лазерами на реакции  $F_2 + H_2(D_2)$  показал актуальность проблемы быстрого и безопасного приготовления рабочих смесей в активных объемах лазеров. Фтор — один из самых реакционно-способных химических элементов. Реакция  $F_2 + H_2(D_2)$  протекает по разветвленно-цепному механизму, вследствие чего приготовление смесей при одновременном напуске реагентов в реактор может сопровождаться вхождением их в область самовоспламенения. Как показано в работе [1], смесь стабилизируется образующимся при напуске фтористым водородом, однако, с другой стороны, фтористый водород может негативно влиять на характеристики генерации. Поэтому добавочно возникает проблема приготовления смесей с минимальным количеством фтористого водорода.

Эти и другие возникающие при смешении проблемы, обусловленные разветвленно-цепным механизмом реакции фторирования водорода, детально обсуждаются в работе [1]. Существует еще одна причина воспламенения приготавливаемой смеси, обусловленная возможным наличием застойных зон в напускном тракте. Зстойные зоны являются очагами воспламенения и стабилизаторами горения.

Данная работа посвящена описанию разработанных нами эффективного компактного смесителя и технологии быстрого и безопасного приготовления фтороводородных смесей, обеспечивающей постоянную скорость напуска реагентов в реактор. Предложенные решения подходят в случае приготовления любых газовых смесей.

### КОНСТРУКЦИЯ СМЕСИТЕЛЯ

Для безопасного приготовления смесей использовали технологию, в основе которой лежат следующие главные моменты: 1) быстрота смешения реагентов обеспечивается за счет разделения их на множество перемежающихся струй; 2) устраняется возможность образования застойных зон; 3) скорость движения смеси по напускному тракту всюду превышает нормальную скорость горения. Подходящим оказался смеситель на основе структуры из чередующихся отверстий для окислителя и горючего. Характерный размер структуры (расстояние между соседними отверстиями) выбирался достаточно малым, чтобы исключить возможность возникновения застойных зон путем образования отрывного циркуляционного течения, способствующего стабилизации пламени за счет переноса тепла и активных центров к свежей смеси обратными токами.



**Рис. 1.** Конструкция смесителя. 1 – корпус смесителя; 2 – фланец; 3 – капилляры (показаны 2 капилляра); 4 – пластина, в которую впаиваются концы капилляров; 5, 6 – вводы для “предсмесей” с H<sub>2</sub>(D<sub>2</sub>) и F<sub>2</sub> соответственно.

Изготовленный из нержавеющей стали смеситель содержал 48 капилляров (из нержавеющей стали) с внешним диаметром 0.1 см и внутренним 0.04 см, плотно упакованных в цилиндрический канал с внутренним диаметром 0.8 см. Конструкция смесителя схематически представлена на рис. 1.

Через капилляры 3 (на рис. 1 показаны 2 капилляра из 48), используя ввод 5, подавали “предсмесь”, содержащую H<sub>2</sub> (или D<sub>2</sub>), а через промежутки между капиллярами, используя ввод 6, – “предсмесь”, содержащую F<sub>2</sub>. Обычно использовали “предсмеси” с составом 0.1H<sub>2</sub> (или D<sub>2</sub>) + 0.9He и 0.3F<sub>2</sub> + 0.06O<sub>2</sub> + 0.64He, дающие при равном расходе требуемую рабочую смесь 0.15F<sub>2</sub> + 0.05H<sub>2</sub> + 0.03O<sub>2</sub>. Кислород добавляется для стабилизации смесей.

Концы капилляров впаивались с помощью свинцово-оловянного припоя в круглую латунную пластину 4 с 48 отверстиями. Пластина вакуумно плотно устанавливалась между корпусом 1 и фланцем 2. Эта пластина разделяла полости, через которые подавались “предсмеси” в смеситель.

Конструкция смесителя обеспечивала в экспериментах суммарную пропускную способность до 2 л · атм/с. Для обычных химических HF(DF)-лазеров с энергией в импульсе 100–150 Дж и рабочим объемом 5–10 л, используемых в наших экспериментах, время готовности лазера к работе при этом составляло 3–5 с. Наибольший габаритный размер смесителя не превышал 10 см.

### ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАБОТЫ КАПИЛЛЯРНОГО СМЕСИТЕЛЯ

Рассмотрим случай истечения газа через капилляр в среду с возрастающим по мере напуска газа давлением. При движении сжимаемого газа в капилляре с трением связь между безразмерными скоростями потока во входном 1 и выходном 2 сечениях задается соотношением [2, с. 249]:

$$1/\lambda_1^2 - 1/\lambda_2^2 - \ln(\lambda_2^2/\lambda_1^2) = \chi, \quad (1)$$

где  $\chi = \frac{2\zeta}{k+1} \frac{L}{d}$ ;  $\lambda_1, \lambda_2$  – безразмерные скорости движения газа во входном 1 и выходном 2 сечениях капилляра в долях критической скорости  $c^*$  (критическая скорость потока  $c^*$  равна местной скорости звука);  $\zeta$  – коэффициент сопротивления капилляра;  $k$  – показатель изоэнтропии;  $L, d$  – длина и внутренний диаметр капилляра соответственно.

Для капилляра с круглым сечением при сравнительно небольших числах Рейнольдса ( $Re < 2300$ ), когда течение носит ламинарный характер, коэффициент  $\zeta = 64/Re$ . Число Рейнольдса записывается как  $Re = cd/v$ , где  $c$  – средняя расходная скорость движения газа,  $v$  – кинематическая вязкость газа. Перепишем число Рейнольдса в следующем виде:  $Re = cdf/(v\rho f)$ , где  $\rho$  – плотность газа,  $f = \pi d^2/4$  – площадь сечения капилляра. Учитывая, что массовый расход газа через капилляр  $m = c\rho f = M/N$  ( $M$  – массовый расход газа через  $N$  капилляров),  $v\rho = \eta$  ( $\eta$  – динамическая вязкость газа), для числа Рейнольдса получим выражение  $Re = 4M/\pi\eta dN$ . Тогда

$$\zeta = 16\pi\eta dN/M, \quad (2)$$

$$\chi = 32\pi\eta NL/((k+1)M). \quad (3)$$

Массовые расходы газа в сечениях 1 и 2 с учетом всех капилляров записываются  $M_1 = c_1\rho_1F$  и  $M_2 = c_2\rho_2F$ , где  $F = fN$  – сумма площадей отверстий всех капилляров. Представим выражения для массовых расходов в виде  $(c_1/c_1^*)c_1^*(\rho_1/\rho_{01})\rho_{01}F$  и  $(c_2/c_2^*)c_2^*(\rho_2/\rho_{02})\rho_{02}F$ . Здесь и далее индекс “0” будем относить к параметрам заторможенного газа. По определению  $c_1/c_1^* = \lambda_1, c_2/c_2^* = \lambda_2$ . Из [2, с. 58–

$$59] \frac{\rho_1}{\rho_{01}} = \left(1 - \frac{k-1}{k+1}\lambda_1^2\right)^{\frac{1}{k-1}}, \frac{\rho_2}{\rho_{02}} = \left(1 - \frac{k-1}{k+1}\lambda_2^2\right)^{\frac{1}{k-1}}, c_1^* = \sqrt{\frac{2k}{k+1} \frac{RT_{01}}{\mu}}, c_2^* = \sqrt{\frac{2k}{k+1} \frac{RT_{02}}{\mu}}.$$

Из уравнения состояния  $\rho_{01} = P_{01}\mu/RT_{01}, \rho_{02} = P_{02}\mu/RT_{02}$ , где  $\mu$  – молекулярный вес газа,  $P_{01}, P_{02}$  и  $T_{01}, T_{02}$  – давление и температура торможения в сечениях 1 и 2 соответственно. При течении без энергообмена (изоэнтропийное течение)  $T_{01} = T_{02} = T_0$ . С учетом сказанного можно получить:

$$M_1 = \lambda_1 \left(1 - \frac{k-1}{k+1}\lambda_1^2\right)^{\frac{1}{k-1}} \sqrt{\frac{2k}{k+1} \frac{\mu}{RT_0}} P_{01}F, \quad (4)$$

$$M_2 = \lambda_2 \left(1 - \frac{k-1}{k+1}\lambda_2^2\right)^{\frac{1}{k-1}} \sqrt{\frac{2k}{k+1} \frac{\mu}{RT_0}} P_{02}F. \quad (5)$$

Статическое давление  $P_2$  в сечении 2, выраженное в долях давления полного торможения  $P_{02}$ , записывается [2, с. 59] в виде

$$\frac{P_2}{P_{02}} = \left(1 - \frac{k-1}{k+1} \lambda_2^2\right)^{\frac{k}{k-1}}. \quad (6)$$

С учетом (6) соотношение (5) переписывается как

$$M_2 = \lambda_2 \left(1 - \frac{k-1}{k+1} \lambda_2^2\right)^{-1} \sqrt{\frac{2k}{k+1} \frac{\mu}{RT_0}} P_2 F. \quad (7)$$

При истечении через капилляр скорость газа не может быть больше местной скорости звука, следовательно, расширение в капилляре осуществляется до давлений, не меньших критического давления  $P_2^*$ . При  $P_2 = P_2^*$  скорость  $\lambda_2 = 1$ . Если давление газа в реакторе  $P_3$  меньше критического, то расход газа через капилляр определяется величиной  $P_2^*$  и не зависит от давления в реакторе. Если давление в реакторе становится больше критического, скорость истечения становится дозвуковой и давление  $P_2$  на срезе капилляра сравнивается с давлением в реакторе  $P_3$ .

Подставив в формулу (1) выражение для  $\chi(3)$ , можем получить

$$M = \frac{32\pi\eta NL}{(1/\lambda_1^2 - 1/\lambda_2^2 - \ln(\lambda_2^2/\lambda_1^2))(k+1)}. \quad (8)$$

Массовые расходы газа  $M_1$  и  $M_2$  в сечениях 1 и 2 в силу неразрывности течения равны между собой. При выполнении равенства  $M_1 = M_2 = M$  система уравнений (4), (7), (8) дает связь между пятью параметрами –  $P_{01}$ ,  $P_2$ ,  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$ ,  $M$ , и если задать два из них, то остальные три однозначно определяются этой системой. Удобно вместо массового расхода газа  $M$  [г/с] использовать объемный расход газа  $Q$  [л · атм/с]. Связь между ними дается соотношением  $Q = (M/\mu)V_0$ , где  $V_0$  – объем идеального газа, равный при стандартных условиях 22.4 л · атм/моль. На рис. 2 приведены зависимости объемного расхода “предсмеси”, содержащей водород, от давления в реакторе  $P_3$  при различных величинах давления на входе капилляров. Использованные в расчетах значения параметров:

$k$	$\mu$ , г/моль	$\eta$ , пуаз	$N$	$d$ , см	$L$ , см	$T_0$ , К
1.625	3.8	0.0002	48	0.04	5.5	300

По расчетам при  $Q = 3.73$  л · атм/с (соответствует значению  $P_{01} = 2$  атм на рис. 2) число Рейнольдса  $Re = 2100$  и при дальнейшем увеличении давления  $P_{01}$  газовый поток перестает быть ламинарным. Горизонтальные участки кривых на рис. 2

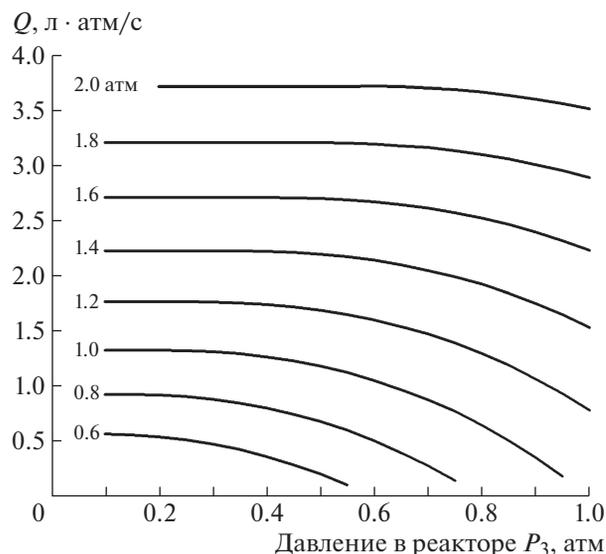


Рис. 2. Зависимость расхода “предсмеси” с составом 0.1H<sub>2</sub> + 0.9He через систему капилляров от давления газа в реакторе. Числа у кривых указывают давление на входе капилляров.

отвечают ситуации, когда давление в реакторе  $P_3$  меньше критического давления  $P_2^*$ . При  $P_3 > P_2^*$  наблюдается падение расхода газа через капилляры с увеличением давления в реакторе для всех значений  $P_{01}$ , причем относительная величина падения растет с уменьшением давления на входе капилляров.

## ТЕХНОЛОГИЯ ПРИГОТОВЛЕНИЯ РАБОЧЕЙ СМЕСИ

На практике желательно иметь постоянную скорость напуска газа в реактор вне зависимости от возрастающего по мере напуска давления в нем. Для решения этой задачи в напускной тракт перед капиллярами помещали шайбу с отверстием, работающим в критическом режиме. Шайбу изготавливали из алюминиевой фольги толщиной 0.5 мм. Отверстие в фольге пробивали стальной конической иглой. Размер отверстия контролировали с помощью микроскопа отсчетного типа с увеличением  $24\times$ .

Уравнение расхода газа через критическое сечение записывается в виде  $M^* = \rho^* c^* F^* = (\rho^*/\rho_0) c^* F^* \rho_0$ .

Учитывая, что  $\frac{\rho^*}{\rho_0} = \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{1}{k-1}}$  [2, с. 62],  $\rho_0 = P_{01} \mu / RT_0$ ,  $c^* = \sqrt{\frac{2k}{k+1} \frac{RT_0}{\mu}}$ , получаем

$$M^* = \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k+1}{2(k-1)}} \sqrt{\frac{k\mu}{RT_0}} P_{01} F^*, \quad (9)$$

где  $\rho_0$ ,  $P_0$ ,  $T_0$  – параметры полностью заторможенного газа. Критический расход прямо пропорционален начальному давлению  $P_0$ , площади отверстия  $F^*$  и не зависит от противодавления. Критический режим для отверстия возможен, если выполняется неравенство  $P^* \geq P_{01}^{\max}$ , где  $P^* =$

$$= \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}} P_0 - \text{критическое давление, } P_{01}^{\max} - \text{максимальное давление перед капиллярами, достигаемое в конце напуска газа в реактор. Следовательно,}$$

должно выполняться условие  $P_0 \geq \left( \frac{k+1}{2} \right)^{\frac{k}{k-1}} P_{01}^{\max}$ .

Для рассматриваемого газа это отвечает с хорошей точностью требованию  $P_0 \geq 2P_{01}^{\max}$ . Если считать, что давление в реакторе в конце напуска составляет  $P_3 = 1$  атм, то, согласно рис. 2,  $P_{01}^{\max} = 1.125, 1.25, 1.38$  атм для расходов  $Q = 0.5, 1, 1.5$  л · атм/с соответственно, и значит в этих случаях  $P_0 = 2.25, 2.5, 2.76$  атм. При выполнении условия  $P_0 \geq 2P_{01}^{\max}$  отверстие обеспечивает заданными значениями  $P_0$  и  $F^*$  расход  $M^*$ . В силу неразрывности течения при этом должно выполняться равенство  $M^* = M$ . Постоянство расхода в ходе напуска газа в реактор обеспечивается автоматической подстройкой давления  $P_{01}$ . Проведенное рассмотрение приводит к практически важному результату: расход газа через систему капилляров можно задать критическим расходом газа через отверстие при надлежащем выборе начального давления  $P_0$  и площади отверстия  $F^*$ . Правильный подбор значений  $P_0$  и  $F^*$  обеспечивает как заданный расход газа, так и его постоянство в ходе напуска в реактор.

Отметим, что проведенный расчет касался изоэнтروпийного течения. Реально картина течения газа сложнее. Изоэнтропийным можно считать течение до и после капилляра, течение газа в капилляре происходит с энергообменом в силу малости поперечного размера капилляра. В предельном случае бесконечно быстрого энергообмена течение в капилляре будет изотермическим с температурой газа, равной температуре стенки. Можно показать, что в этом случае уравнение (1) преобразуется в уравнение

$$((k+1)/2k)(1/\lambda_1^2 - 1/\lambda_2^2) - \ln(\lambda_2^2/\lambda_1^2) = \chi. \quad (10)$$

Отличие в результатах расчетов при замене уравнения (1) на уравнение (10) не превышает нескольких процентов.

В описываемом смесителе, как указывалось, 48 капилляров с внешним диаметром 0.1 см упа-

кованы в цилиндр с внутренним диаметром 0.8 см. Между капиллярами при их упаковке образуются каналы, отличающиеся, вообще говоря, как поперечными размерами, так и формой вследствие неидеальности упаковки. В каналы с наибольшими размерами вставляли проволоку подходящего диаметра. Общее число каналов в конечном итоге составило 64. Через эти каналы подавали “предсмесь” с фтором. Из-за неоднородности каналов строгий расчет для “предсмеси” с фтором затруднителен. Однако с учетом вышеизложенного можно обойтись вообще без расчета: при заданном  $Q$  л · атм/с нужно просто подобрать начальное давление  $P_0$  и площадь отверстия  $F^*$  такими, чтобы они обеспечивали нужный расход и его постоянство в течение напуска, что нетрудно.

Объемные расходы  $Q$  обеих “предсмесей” выбирали одинаковыми. В этом случае суммарный расход газа через смеситель равен  $2Q$  и средняя скорость в соединительной трубке с внутренним диаметром  $D = 0.8$  см составляет  $c = (2Q/P_3)/(\pi D^2/4)$ . Скорость потока минимальна в конце напуска, когда  $P_3 = 1$  атм, и при  $Q = 1$  л · атм/с, например, она составит 40 м/с, что больше скорости распространения пламени [3].

В напускной тракт созданной установки помимо смесителя и шайб с отверстиями, задающими критический расход “предсмесей”, входили быстроедействующие электроклапаны для включения и отключения газовых потоков и резервуары с “предсмесями”. Давление газа в резервуаре задает начальное давление  $P_0$  перед соответствующим отверстием. Объем резервуара выбирался таким, чтобы в ходе напуска величина  $P_0$  падала несильно.

Обычно падение давления не превышало 10–15%. Соответственно скорости напуска смеси в начале и в конце отличались на 10–15%, что допустимо. При необходимости эту разницу можно уменьшить, например, увеличив объем расходных резервуаров или используя устройства, поддерживающие в них постоянное давление. После напуска давление в резервуарах восстанавливалось до требуемой величины за счет “предсмесей”, заранее приготовленных и хранимых в стальных баллонах объемом 10 л при давлении 15–25 атм. Эксплуатационные параметры созданной установки сохраняли стабильность в течение длительного времени работы, обеспечивая воспроизводимость характеристик лазера от опыта к опыту.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Подытожим сказанное. Разработана конструкция компактного смесителя, обеспечиваю-

щего эффективное смешение газов, с суммарной производительностью до  $2 \text{ л} \cdot \text{атм/с}$ . Смеситель обеспечивает готовность лазера к работе в течение нескольких секунд. При разработке смесителя особое внимание уделено проблеме безопасного смешения высокореакционных газов. Предложена схема напуска газов с использованием расходных шайб с отверстиями, работающими в критическом режиме, которая обеспечивает постоянство расхода смешиваемых газов в течение всего напуска.

Работа выполнена при финансовой поддержке госзадания 01201361840.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Васильев Г.К., Макаров Е.Ф., Чернышев Ю.А.* // Физика горения и взрыва. 1983. Т. 39. № 3. С. 9.
2. *Дойч М.Е., Зарянкин А.Е.* Гидрогазодинамика. М.: Энергоиздат, 1984.
3. *Бурцев В.В., Великанов С.Д., Фролов Ю.Н.* // Квантовая электроника. 1995. Т. 22. № 2. С. 123.