

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.

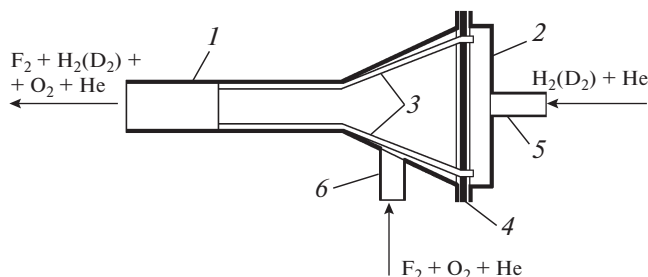


Рис. 1. Конструкция смесителя. 1 – корпус смесителя; 2 – фланец; 3 – капилляры (показаны 2 капилляра); 4 – пластина, в которую впаиваются концы капилляров; 5, 6 – вводы для “предсмесей” с H₂(D₂) и F₂ соответственно.

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 H₂ (или D₂), а через промежутки между капиллярами, используя ввод 6, – “предсмесь”, содержащую F₂. Обычно использовали “предсмеси” с составом 0.1H₂ (или D₂) + 0.9He и 0.3F₂ + 0.06O₂ + 0.64He, дающие при равном расходе требуемую рабочую смесь 0.15F₂ + 0.05H₂ + 0.03O₂. 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 $\chi = \frac{2\zeta}{k+1} \frac{L}{d}$; λ_1, λ_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); ζ – 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: $Re = cdf/(vrf)$, где ρ – 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), $vr = \eta$ (η – 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 μ – 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 , λ_1 , λ_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	μ , г/моль	η , 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

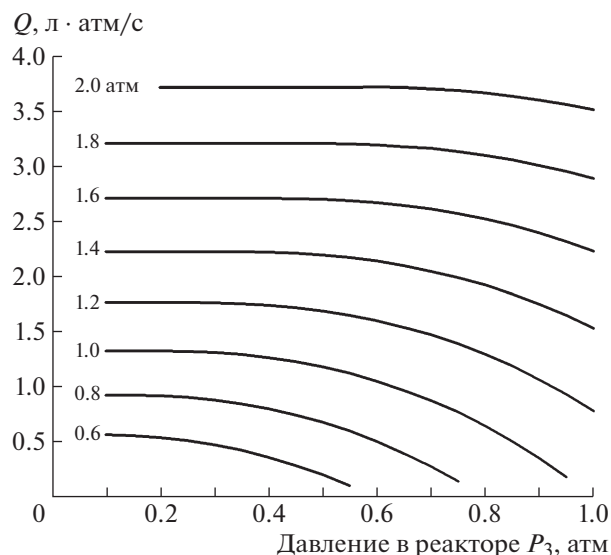


Рис. 2. Зависимость расхода “предсмеси” с составом $0.1\text{H}_2 + 0.9\text{He}$ через систему капилляров от давления газа в реакторе. Числа у кривых указывают давление на входе капилляров.

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 ρ_0 , P_0 , T_0 – параметры полностью заторможенного газа. Критический расход прямо пропорционален начальному давлению P_0 , площади отверстия F^* и не зависит от противодействия. 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 высокорреакционных 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.