

ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ ПРОЦЕССА ВИБРАЦИОННОГО ГОРЕНИЯ ВОДОРОДА В ТРУБАХ

С. Г. Миронов, А. В. Потапкин

Институт теоретической и прикладной механики СО РАН, 630090 Новосибирск, potapkin@itam.nsc.ru

Представлены результаты экспериментальных исследований процесса вибрационного горения водорода в эжектируемом потоке воздуха в кварцевых трубках. Исследования выполнены с помощью оптической системы, позволяющей регистрировать интенсивность свечения радикалов ОН в водородном факеле. По результатам измерений найдено положение зон локального тепловыделения.

Ключевые слова: водород, вибрационное горение, эжектируемый поток воздуха, оптический метод измерения.

Применение оптического метода регистрации интенсивности излучения электронно-возбужденных радикалов ОН в диапазоне длин волн $280 \div 340$ нм для определения степени выгорания и полноты сгорания водорода в дозвуковых, трансзвуковых и сверхзвуковых потоках экспериментально обосновано в работах [1, 2]. Этот метод использован в настоящей работе при изучении вибрационного горения водорода в эжектируемом потоке воздуха в трубках.

Схема экспериментов представлена на рис. 1. Газообразный водород подавался в инжектор (диаметр отверстия жиклера 1 мм), который размещался внутри прозрачной вертикально расположенной кварцевой трубки. Пропускание ультрафиолетового излучения кварцевой трубкой составляло не менее 90 %. Топливная смесь водорода и эжектированного воздуха в начале эксперимента воспламенялась внешним пламенем. Расход водорода определялся по перепаду давления на гидросопротивлении в системе подвода водорода. Для регистрации интенсивности свечения радикалов ОН применена оптическая система, включавшая оптический фильтр, кварцевую линзу, фотоэлектронный умножитель (ФЭУ-39А). Полоса пропускания ФЭУ 100 кГц. Электрический сигнал с ФЭУ подавался в блок регистрации, представляющий собой магнитограф НО 67, полоса пропускания которого 20 кГц. Порядок проведения экспериментов обеспечивал синхронную запись расхода водорода и интенсивности ультрафиолетового излучения водородного пламени. Для сравнительного анализа в ряде экспериментов кварцевую трубку убрали, что позволяло регистрировать излучение

от диффузионного водородного факела. Дополнительно проводилось фотографирование пламени в ультрафиолетовом и видимом спектрах. В этих случаях вместо ФЭУ применялся фотоаппарат. Оптическая система размещалась на расстоянии 1950 мм от факела, что обеспечивало регистрацию всего факела.

В ходе экспериментов измерялись амплитуды звука, генерируемого пламенем. Для этого применялся конденсаторный микрофон М101, который размещался на некотором удалении от трубки. Результаты измерений использовались при анализе режимов горения и носили вспомогательный характер.

На рис. 2 представлены четыре фотографии пламени в трубке с внутренним диаметром 18 мм и длиной $L = 180$ мм. Фотографии *a–в* получены в видимом свете без при-

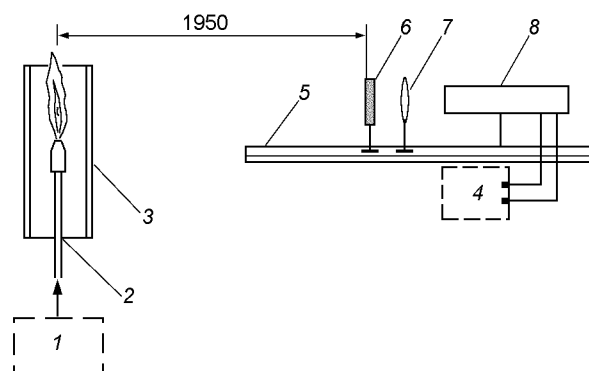


Рис. 1. Схема эксперимента:

1 — система подвода водорода, 2 — инжектор с жиклером, 3 — кварцевая трубка, 4 — система регистрации интенсивности излучения, 5 — оптический рельс, 6 — оптический фильтр, 7 — линза, 8 — ФЭУ

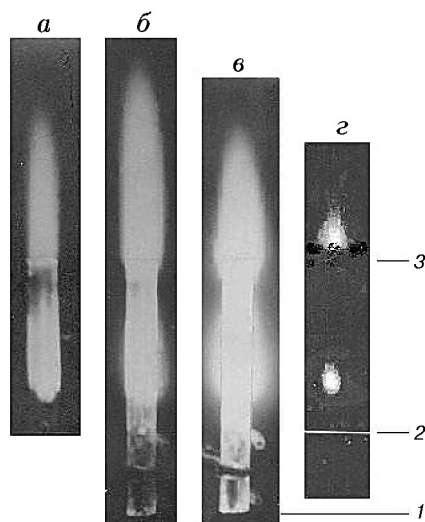


Рис. 2. Фотографии водородного пламени в трубке:

диаметр трубки 18 мм, длина 180 мм; *a–в* — фотографии в видимом свете, $Q = 0.66$ (*a*), 1.26 (*б*), 1.56 л/с (*в*), *г* — компьютерная обработка фотографии в ультрафиолетовом спектре, $Q = 1.58$ л/с; 1 — положение нижнего среза трубы, 2 — жиклера в трубе, 3 — верхнего среза трубы

менения фильтров, фотография *г* — в ультрафиолетовом спектре с применением канального электронно-оптического преобразователя (ЭОП), дополнительно обработанная на компьютере с увеличением контрастности. Все фотоизображения выровнены относительно положений нижнего среза трубы. Снимки соответствуют различным объемным расходам водорода: $Q = 0.66, 1.26, 1.56$ и 1.58 л/с (расходы приведены к нормальным условиям). Снимки *a, б* соответствуют первому режиму вибрационного горения, для которого характерны умеренный уровень звука и вытянутая форма факела над верхним срезом трубы. Снимок *в* отражает типичную ситуацию второй стадии вибрационного горения (развитое вибрационное горение), переход к этой стадии горения при увеличении расхода происходит скачком с мгновенным увеличением уровня звука и изменением формы факела. Пламя забрасывается на внешнюю поверхность трубки, а факел укорачивается. Засветка фотографий в центральной части трубки и над ее верхним срезом показывает области интенсивного горения водорода.

Тарировка системы подвода водорода и

оценки параметров инжектируемого потока водорода, полученные с помощью соотношений Сен-Венана — Вентцеля, показали, что в отверстии жиклера параметры потока водорода достигают критических значений при $Q \approx 1.1$ л/с. Первая стадия вибрационного горения реализуется уже при значении $Q \approx 0.4$ л/с, т. е. при дозвуковом истечении водорода из инжектора. На снимке *a* в верхней части трубы видна темная зона, которая показывает, что процесс горения прерывается внутри трубки и догорание водорода происходит над верхним срезом трубки после смешивания с воздухом. Воспламенение вновь образовавшейся смеси происходит из-за высокой температуры газов, выходящих из трубки. Изображения в ультрафиолетовом спектре для ситуаций, показанных на снимках *a* и *б*, мало отличаются от изображения *г*. Отличие только в положении зон яркого свечения. Нижняя зона (первая зона горения) располагается ближе к жиклеру, а верхняя (вторая зона горения) — ближе к срезу трубки. Эти снимки здесь не приведены. Положение первой зоны горения в трубе зависит от расхода водорода и положения инжектора относительно нижнего среза трубы. В случае развитого вибрационного горения (снимки *в, г*) нижняя кромка светящейся первой зоны горения расположена на отметке $l/L = 0.44$, а верхняя кромка — на отметке $l/L = 0.58$, т. е. область интенсивного тепловыделения располагается в средней части трубы, что в соответствии с теорией вибрационного горения [3] является одним из условий реализации вибрационных режимов горения. Верхняя зона тепловыделения расположена над срезом трубы $1.02 < l/L < 1.14$, и в соответствии с теорией тепловыделение в этой зоне не может приводить к вибрационным режимам горения. (Здесь l — расстояние от нижнего среза трубы до светящейся зоны.)

На рис. 3 представлены результаты измерения интенсивности излучения в ультрафиолетовом спектре диффузионного факела и пламени в той же трубке. Сумма интенсивностей излучения при горении над верхним срезом трубки и вблизи жиклера (кривые 3, 4) мало отличается от интенсивности излучения при горении в трубке (кривая 2). Область в трубке между зонами горения слабо излучает в ультрафиолетовом спектре. Интенсивность излучения зоны горения над трубкой больше, чем вблизи жиклера. Видно также, что при вибрационном горении в трубке суммарное ультра-

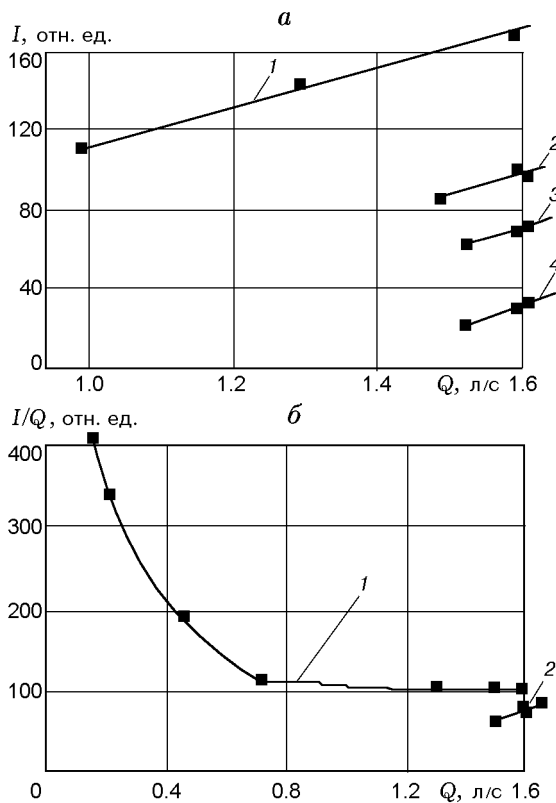


Рис. 3. Интенсивность ультрафиолетового излучения пламени:

1 — излучение диффузионного факела, 2 — общее излучение при горении в трубке, 3 — излучение пламени над верхним срезом трубки, 4 — излучение пламени над жиклером

фиолетовое излучение меньше, чем от диффузионного факела.

Зависимость относительной величины I/Q от расхода Q для диффузионного факела (рис. 2, б) типична и известна по работам многих авторов. Для турбулентного пламени в диапазоне $0.1 < Q < 0.7$ л/с число Рейнольдса струи водорода $1500 < Re < 10000$. Здесь $Re = dV/\eta$, d — диаметр отверстия жиклера, V — скорость водорода в отверстии жиклера, η — кинематическая вязкость водорода. С возрастанием расхода от 0.1 до 0.7 л/с относительная интенсивность излучения быстро уменьшается и выходит на постоянное значение. В области $Re > 10000$ интенсивность излучения и расход водорода связаны линейной функцией.

С помощью фотографий построена зависимость длины диффузионного водородного факела от расхода водорода. Длина ламинарного факела увеличивается с ростом Q , а при тур-

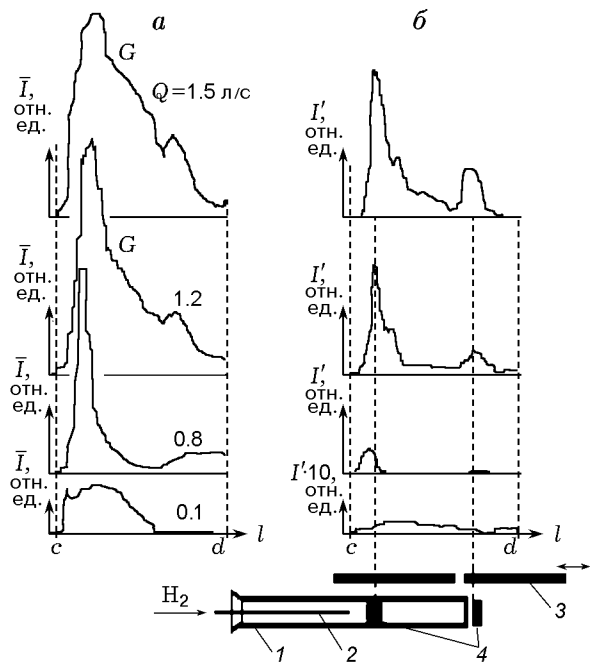


Рис. 4. Схема эжектора и результаты измерения интенсивности ультрафиолетового излучения пламени:

a — постоянная составляющая, b — амплитуда пульсационной составляющей; 1 — трубка, 2 — инжектор, 3 — экран со щелью (c , d — крайние положения щели), 4 — зоны горения

булентном горении длина факела постоянна и не зависит от расхода водорода. Зависимость качественно согласуется с данными [4, 5].

На рис. 4 представлены результаты измерения интенсивности ультрафиолетового излучения: постоянной \bar{I} (до 5 Гц) и переменной I' (свыше 5 Гц до 20 кГц) составляющих сигнала ФЭУ при сжигании водорода в вертикальной трубке длиной 233 мм с внутренним диаметром 23 мм. Для удобства представления результатов трубка на рисунке показана горизонтально. Между трубкой и приемником излучения располагался непрозрачный экран, в котором имелась щель шириной 3 мм. Экран перемещался вдоль трубки, что позволило получить распределение интенсивности излучения по длине трубки. Изображение трубки с экраном привязано к рис. 4, б с соблюдением одинаковости масштабов по l . В том же линейном масштабе представлен и рис. 4, а. Как видно из рис. 4, а, процессы горения при различных расходах водорода принципиально различаются. При $Q = 0.1$ л/с внутри трубки происходит полное сгорание водорода без развития пульса-

ций интенсивности излучения (при этом звук не генерируется). Увеличение расхода водорода при дозвуковом истечении из инжектора приводит к развитию вибрационного горения. При $Q = 0.8$ л/с основная доля водорода сгорает вблизи жиклера в узкой зоне. Догорание водорода происходит над верхним срезом трубки после смешения выходящих газов с атмосферным воздухом.

При $Q \geq 1.2$ л/с в отверстии жиклера параметры водорода сверхкритические, что должно приводить к формированию сверхзвуковой недорасширенной струи водорода в эжектируемом потоке воздуха. Горение водорода сопровождается интенсивным звуком. Пламя дальше отрывается от жиклера, и максимум постоянной составляющей интенсивности излучения от первой зоны горения начинает уменьшаться с ростом Q , а от второй зоны горения — возрастать. Распределение по длине переменной составляющей интенсивности излучения и точки изменения наклона кривых постоянной составляющей позволяют выделить зоны интенсивного горения и тепловыделения. Акустические колебания регулируют подвод в эти зоны дополнительных порций воздуха и отвод из них продуктов сгорания, что объясняет наличие двух пиков переменной составляющей интенсивности излучения, низкий уровень пульсаций интенсивности излучения от области течения между зонами интенсивных пульсаций и заброс пламени на внешнюю поверхность трубки. Полученные распределения интенсивности излучения отличаются от распределения излучения диффузионного пламени [6]. Можно предполагать, что точка G на падающей кривой постоянной составляющей интенсивности излучения показывает границу зоны горения, где проявляется влияние акустических колебаний.

Для получения режимов развитого вибрационного горения в кварцевой трубке диаметром 48 мм и длиной 470 мм требовался расход водорода $Q \approx 5$ л/с. Такой расход достигался увеличением полного давления инжектируемого водорода. Для газовых эжекторов при стационарных режимах работы известны оценки коэффициента эжекции [7]. Если температуры торможения инжектируемого и эжектируемого газов одинаковы, то коэффициент эжекции прямо пропорционален площади поперечного сечения эжектора и обратно пропорционален полному давлению водорода. Если пред-

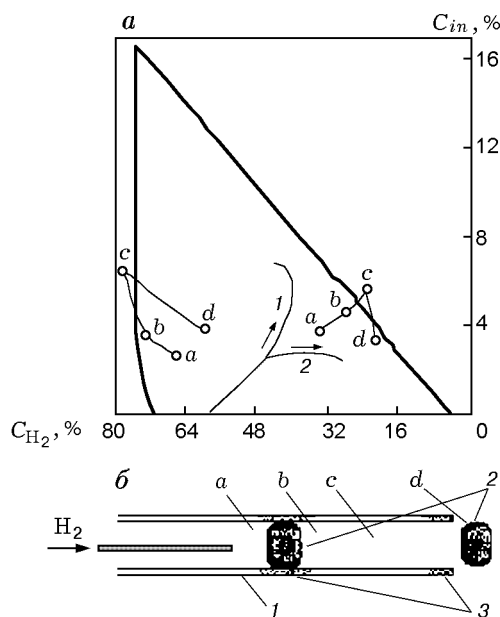


Рис. 5. Пределы воспламенения водорода:

a: 1 — горение при дополнительном подводе водорода, 2 — горение при дополнительном подводе окислителя, точки *a–d* соответствуют точкам на схеме *б*; 1 — трубка, 2 — зоны горения, 3 — области разрушения стенок трубки, *a–d* — положения выделенного объема газа

положить, что стационарные соотношения в какой-то мере справедливы для эжекторов при нестационарных режимах работы, то с учетом различия удельных теплоемкостей водорода и воздуха оценка коэффициента избытка воздуха для описанных экспериментов дает значения как меньше, так и больше единицы. Разрывы в пламени при горении водорода в трубке, наблюдаемые в настоящих экспериментах, могут быть объяснены одновременным протеканием двух процессов. С одной стороны, акустические процессы приводят к изменению коэффициента избытка эжектируемого воздуха, с другой стороны — расходование кислорода при горении водородно-воздушной смеси по мере ее движения в трубке должно сопровождаться увеличением относительного объемного содержания инертных добавок (азота и воды) по отношению к объему воздуха в газах.

Предлагается следующая схема процессов горения. На рис. 5 показаны пределы воспламенения водорода [8] (C_{H_2} — объемное содержание водорода в водородно-воздушной смеси, C_{in} — объемное содержание инертных добавок в воздухе). Областью горения водорода является область, ограниченная кривой и осью абс-

цисс. Вне этой области горения нет. Инертными добавками являются вода, азот и т. д. Известно, что пределы воспламенения водорода расширяются с ростом температуры и давления, но в качественном описании это не учитывается. Схема эжектора и положение зон горения показаны на рис. 5, б. Расходование в первой зоне горения части инжектируемого водорода и кислорода из эжектируемого воздуха приводит к образованию инертных добавок в виде воды и оставшегося азота и, следовательно, к выходу за пределы области воспламенения и прекращению горения. Горение возобновляется после того, как получившаяся смесь газов истекает из трубки и смешивается с атмосферным воздухом (точка *d*). Воспламенение за выходом из трубки обусловлено высокой температурой газов, истекающих в атмосферу. Процесс горения в этом случае можно изменить разными способами, например, подводом в трубку за первой зоной горения дополнительных порций водорода (кривая 1 на рис. 5, а) или подводом окислителя (кривая 2).

Наличие зоны горения за выходом из трубки должно вызывать изменение коэффициента отражения продольных акустических волн, распространяющихся внутри трубки, что скажется на обратной акустической связи в вибрационном горении. Тепловыделение за выходом из трубки в соответствии с линейной теорией не должно приводить к развитию акустических колебаний, в то же время наличие пламени за выходом из трубки должно каким-то образом влиять на распространение акустических волн внутри эжектора.

Отсутствие надежных аналитических оценок коэффициента эжекции для нестационарных условий работы эжекторных прямоточных камер сгорания требует разработки экспериментальных методик определения этого коэффициента.

Итак, по результатам оптических исследований водородно-воздушного пламени в диффузионных факелах и кварцевых трубках предложена схема процесса вибрационного горения в эжекторных системах, в соответствии с которой при любых соотношениях расходов воздуха и водорода внутри трубки может происходить неполное сгорание водорода. Показано, что интенсивность ультрафиолетового излучения пламени зависит от способа сжигания водорода.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Воронцов С. С., Константиновский В. А., Третьяков П. К.** Определение полноты сгорания водорода в сверхзвуковом потоке оптическим методом // Физическая газодинамика. Новосибирск: ИТПМ СО АН СССР, 1976. С. 69–72.
2. **Баев В. К., Головичев В. И., Третьяков П. К.** Горение в сверхзвуковом потоке. Новосибирск: Наука, 1984.
3. **Раушенбах Б. В.** Вибрационное горение. М: Гос. изд-во физ.-мат. лит., 1961.
4. **Льюис Б., Эльбе Г.** Горение, пламя и взрывы в газах: Пер. с англ. М.: Мир, 1968.
5. **Torii S., Yano T., Iwashita M. Nishinohara.** An experimental study on flame characteristics of hydrogen diffusion flames // Reports of Faculty of Engen. Kagoshima University, 1993. N 35. P. 7–12.
6. **Гейдон А.** Спектроскопия пламен / Пер. с англ.; Под ред. В. Н. Кондратьева. М.: Изд-во иностр. лит., 1959.
7. **Абрамович Г. Н.** Прикладная газовая динамика. М.: Наука, 1976.
8. **Рациональное использование газа в энергетических установках: Справочное руководство /** Под ред. А. С. Иссерлина Л.: Недра, 1990.

*Поступила в редакцию 21/І 2002 г.,
в окончательном варианте — 21/ІІ 2005 г.*