

ПРЕДЕЛЫ ГОРЕНИЯ ВОДОРОДОВОЗДУШНЫХ СМЕСЕЙ В ПРИСУТСТВИИ УЛЬТРАДИСПЕРСНЫХ КАПЕЛЬ ВОДЫ (ТУМАНА)

С. П. Медведев, Б. Е. Гельфанд, А. Н. Поленов, С. В. Хомик

Институт химической физики им. Н. Н. Семенова РАН, 117977 Москва, gelfand@podwal.msk.ru

Экспериментально исследовано горение тумана, состоящего из водородовоздушной смеси, водяного пара и ультрадисперсных капель воды. Горючий туман создавался внезапным расширением системы водород + воздух + водяной пар. Показано, что частичная конденсация пара с образованием микрокапель способствует сужению пределов распространения пламени.

Ключевые слова: пределы горения, гетерогенные смеси, волна разрежения, ИК-диагностика.

ВВЕДЕНИЕ

Исследование горения двухфазных смесей газ + микрокапли имеет два практически важных аспекта. Первый связан с созданием систем «газообразный окислитель + жидкое топливо». Такие системы применяются в ракетных двигателях, топочных агрегатах, а также в камерах сгорания, работающих по дизельному циклу. Для создания облака распыленных капель в технологических устройствах и в лабораторных исследованиях используют различные механические устройства распыления [1]. Исключения представляют опыты в [2], где для формирования микрокапель в виде тумана использовалась камера Вильсона, первоначально заполненная смесью воздуха с парами этанола. Увеличение объема камеры сгорания приводило к расширению исходной смеси и конденсации части паров этанола. Образовавшийся горючий туман состоял из монодисперсных частиц диаметром $5 \div 7$ мкм, равномерно распределенных по объему. Недостатком установки [2] была ограниченная возможность варьирования степени расширения исходной смеси, а следовательно, и концентрации микрокапель.

Другое направление в исследованиях горения систем газ + микрокапли первоначально было связано с разработкой способов предотвращения пожаров и взрывов в угольных шахтах за счет распыления инертной жидкости (обычно воды) в горючей смеси (метан + воздух). Авария на АЭС Three Mile Island (США, 1979 г.) инициировала ряд исследований горения водородовоздушных смесей [3]. Для по-

давления взрывов водорода рассматривали возможность добавления негорючих газов (CO_2 , N_2) или водяного пара [3]. Исследования показали, что для надежного подавления воспламенения и распространения пламени в водородовоздушных смесях концентрация разбавителя (CO_2 или H_2O) по объему должна превышать 60 % [3]. При применении азота необходимая концентрация добавки достигала 70 % [3]. Столь значительные уровни разбавления трудно реализуемы и могут оказывать негативное влияние на рабочий объем из-за повышения давления.

Другим способом подавления взрыва газовой смеси, лишенным отмеченного недостатка, является распыление в ней жидкости (воды) в виде облака мелких капель. В [3] отмечено сужение пределов воспламенения водородовоздушных смесей в присутствии распыленной воды. Эффективность взрывоподавления зависела от размера капель. При диаметре капель $20 \div 50$ мкм (объемная концентрация менее 10^{-3}) наблюдался небольшой сдвиг нижнего предела распространения пламени: от 4 % по объему водорода в воздухе (в отсутствие капель) до $4,5 \div 5,3$ %. При уменьшении размера капель до 10 мкм нижний предел воспламенения по объему водорода составил $7,2 \div 8,5$ % при температуре $20 \div 70$ °С. Дальнейшее уменьшение размера капель оказалось невозможным из-за особенностей механического способа распыления [1].

Более тонкий распыл воды может быть получен за счет конденсации насыщенного пара при его внезапном расширении, например, в камере высокого давления ударной трубы [4–9]. Анализ работ [10–14] показал, что быстрое (искусственное или аварийное) расширение

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 00–03–32236).

паросодержащих газовых систем сопровождается формированием двухфазной смеси газ + микрокапли (туман). Если газовый компонент горючий, то после зажигания волна горения (пламя) распространяется по смеси, в которой облако микрокапель играет роль объемно-поверхностного ингибитора благодаря тепловым потерям на испарение частиц во фронте пламени. При этом имеется возможность варьировать концентрацию капель путем соответствующего изменения начальных условий (паросодержания, температуры и давления смеси в момент начала расширения). В результате открываются новые пути изучения взаимодействия фронта пламени с микрокаплями и определения влияния жидкой фазы на пределы его распространения в несущем горючем газе. Таким образом, переход к методике формирования микрокапель тумана (с размером частиц примерно $1 \div 2$ мкм) в результате быстрого расширения представляется перспективным для нахождения предельных возможностей взрывоподавления за счет измельчения теплопоглощающих элементов, каковыми выступают частицы жидкости.

Частичная конденсация пара при внезапном расширении системы «горючая газовая смесь + водяной пар» вблизи пределов горения создает предпосылки превращения негорючей системы в горючую. Именно в этой ситуации принципиален ответ на вопрос о роли капель тумана при распространении пламени.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Эксперименты проводили в обогреваемой цилиндрической взрывной камере длиной 0,6 м и внутренним диаметром 0,12 м. Схема установки представлена на рис. 1. Для внезапного расширения исследуемой смеси в нижней части камеры установлена разрывная мембрана из алюминиевой или медной фольги.

Взрывную камеру обогревали четырьмя электронагревателями, симметрично расположенными на ее внешней стенке. Суммарная мощность нагревателей 6 кВт, темп нагрева камеры ≈ 200 К/ч. Температуру внутри камеры измеряли шестью хромель-алюмелевыми термопарами. Одну из термопар устанавливали на верхнем фланце камеры, остальные — в специальном штоке диаметром 8 мм, как изображено на рис. 1. В верхний фланец камеры вмонтированы поджигающее устройство

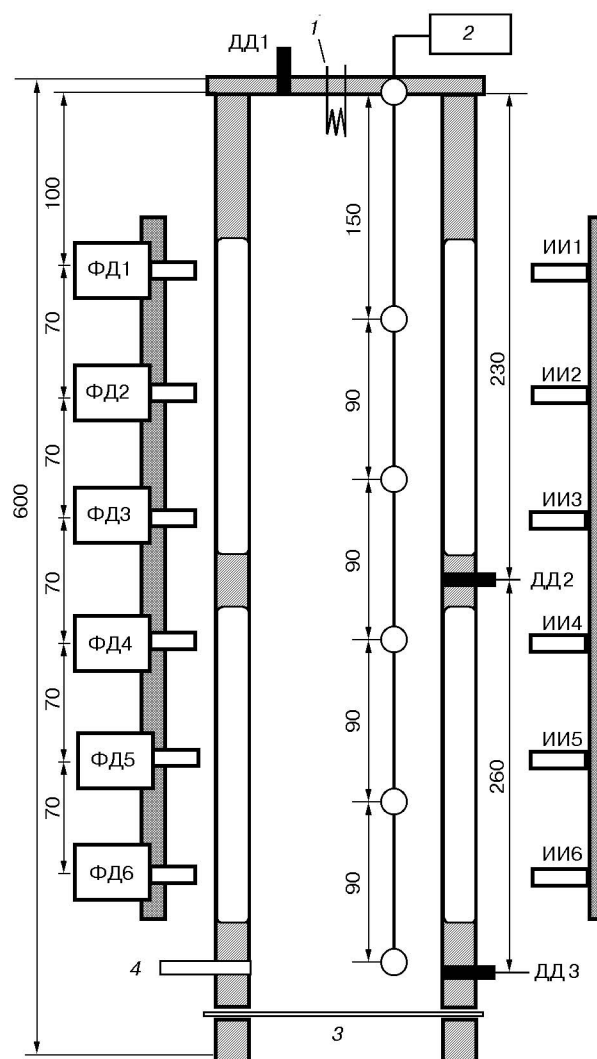


Рис. 1. Схема взрывной камеры:

ФД1–ФД6 — фотодиоды, ИИ1–ИИ6 — инфракрасные излучатели, ДД1–ДД3 — датчики давления, 1 — система поджигания, 2 — термопары, 3 — мембрана, 4 — подача газа

(взрывающаяся проволочка) и датчик давления.

Перед опытом во взрывную камеру вставляли разрывную мембрану и в образовавшийся объем помещали 20 ÷ 40 мл воды. При нагреве камера заполнялась насыщенным паром. После достижения заданного давления пара p_{v1} (при температуре насыщения T_1) в камеру добавляли исследуемую водородовоздушную смесь. Для предотвращения конденсации и обеспечения равномерного перемешивания смесь подавали небольшими порциями через обогреваемую магистраль. При достижении давления p_1 , заданного толщиной мембраны, последняя раз-

рывалась и по камере распространялась волна разрежения. Падение давления (температуры) в проходящей и отраженной от верхнего фланца волн разрежения приводило к конденсации части насыщенного пара. После того как давление в камере уменьшалось до атмосферного (0,1 МПа), камера оказывалась заполненной смесью водород + воздух + пар + микрокапли (туман), готовой к воспламенению. Изменение давления во взрывной камере регистрировали тремя пьезоэлектрическими датчиками (ДД1–ДД3). По истечении установленного на отладочной стадии временного интервала подавали напряжение на взрывающуюся проволочку.

Давление разрыва мембраны варьировали в диапазоне $p_1 = 0,3 \div 1,5$ МПа. Изучали горение водородовоздушных смесей с объемной концентрацией водорода $10 \div 30$ %.

Для визуализации формирования микрокапель (тумана) и процесса распространения пламени в камере имелись окна. Система регистрации распространения пламени включала шесть германиевых фотодиодов (ФД1–ФД6). В отличие от стандартной методики измерения положения фронта пламени в трубах с помощью оптоэлектронных полупроводниковых сенсоров каждый фотодиод работал в сочетании с расположенным напротив инфракрасным излучателем (ИИ1–ИИ6). Излучателями были светодиоды с рабочей длиной волны 0,96 мкм. Измерения давали информацию о формировании тумана и динамике взаимодействия пламени со взвешенными микрокаплями при известной зависимости интенсивности прошедшего через камеру излучения от концентрации и размера частиц.

Пламя является источником ИК-излучения на рабочей длине волны светодиодов. Для разделения сигналов излучения пламени и светодиодов сигнал светодиодов модулировали генератором ступенчатых импульсов Г5-54. Выбранный период модуляции ($50 \div 100$ мкс) значительно ниже характерных времен пробега по камере исследуемых пламен (видимые скорости пламени $5 \div 20$ м/с). Сигналы фотодиодов и датчиков давления записывали встроенным в персональный компьютер многоканальным АЦП Т512.

В опытах реализован метод измерения параметров взвешенного облака микрокапель по поглощению ИК-излучения на двух длинах волн с помощью двухполосного фотодиода. По показаниям такого фотодиода вычисляли раз-

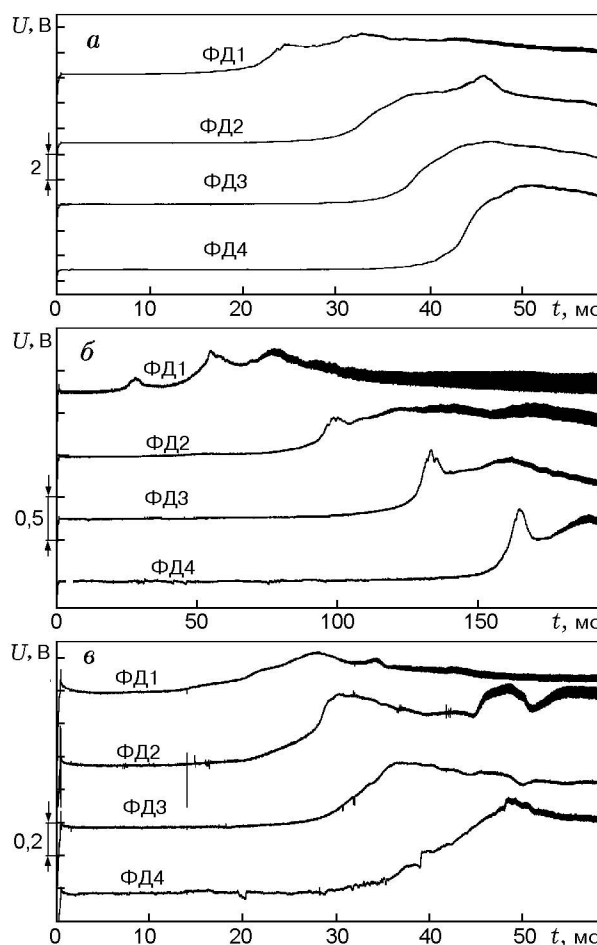


Рис. 2. Записи сигналов излучения при распространении пламени:

a — 30 % H_2 + воздух, $p_1 = 0,75$ МПа, $p_{v1}/p_1 = 0,23$;
б — 18 % H_2 + воздух, $p_1 = 0,79$ МПа, $p_{v1}/p_1 = 0,2$;
в — 10 % H_2 + воздух, $p_1 = 0,9$ МПа, $p_{v1}/p_1 = 0,056$

мер микрокапель и их объемную концентрацию. Пример применения метода поглощения видимого и ближнего инфракрасного излучения к процессам горения представлен в [15], где измеряли размеры и концентрацию частиц сажи в продуктах сгорания керосина. В [16] описано применение двухполосного ФД в качестве чувствительного элемента пирометра спектрального отношения. Время отклика такого ФД на ступенчатый световой импульс (при минимальном коэффициенте усиления) не более 1 мкс. В качестве монохроматических излучателей использовали ИК-светодиод (длина волны $\lambda = 0,96$ мкм) и полупроводниковый лазер ($\lambda = 1,56$ мкм). Параметры тумана измеряли на расстоянии 115 мм от верхнего днища камеры по схеме, описанной в [17].

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

На рис. 2 представлены примеры записи отклика фотодиодов ФД1–ФД4 на распространение пламени вдоль камеры. Время t отсчитывается от момента зажигания ($\cong 43$ мс после разрыва мембраны во всех опытах). При прохождении пламени выходной сигнал фотоприемника растет. Этот рост, свидетельствующий о протекании экзотермических реакций, не является единственным индикатором распространения пламени. Характерная особенность исследуемого процесса состоит в том, что взвешенные микрокапли испаряются при нагреве в зоне реакции и переходят в газовую фазу. Испарение капель ведет к увеличению амплитуды модулированного сигнала соответствующего ИК-излучателя. Методика регистрации изменения модулированного сигнала представляет важное дополнение к системе индикации пламени для бедных водородовоздушных смесей, у которых собственное излучение продуктов сгорания сравнимо с пределом чувствительности фотоприемника.

Количественная информация об испарении микрокапель во фронте пламени может быть получена по результатам измерения поглощения излучения на двух длинах волн с помощью двухполосного ФД. На рис. 3 представлены записи давления $p = p(t)$ и отклика двухполосного ФД $U = U(t)$ в опыте со смесью 30 % H_2 + воздух при $p_1 = 1,34$ МПа и относительном содержании насыщенного пара в момент разрыва мембраны $p_{v1}/p_1 = 0,23$. Рис. 3, *a* представляет полную запись давления датчиком ДД1 и двухполосным ФД, включая стадии расширения и формирования газочапельного облака, зажигания и распространения пламени. Наиболее важные фазы процесса — образование микрокапель в результате конденсации и их испарение во фронте пламени — представлены на рис. 3, *b, в* соответственно в растянутом масштабе времени. Как видно, относительное изменение амплитуды рассеянного излучения на длине волны $\lambda = 1,56$ мкм существенно меньше, чем при $\lambda = 0,96$ мкм. На рис. 3, *г* представлена зависимость объемной доли микрокапель φ от времени. Уменьшение параметра φ из-за испарения во фронте пламени происходит за время $\Delta t \approx 2$ мс.

Знание объемной доли микрокапель дает возможность определять состав горючей смеси в момент зажигания. При этом объемная доля насыщенного пара p_v согласно модели [7, 8]

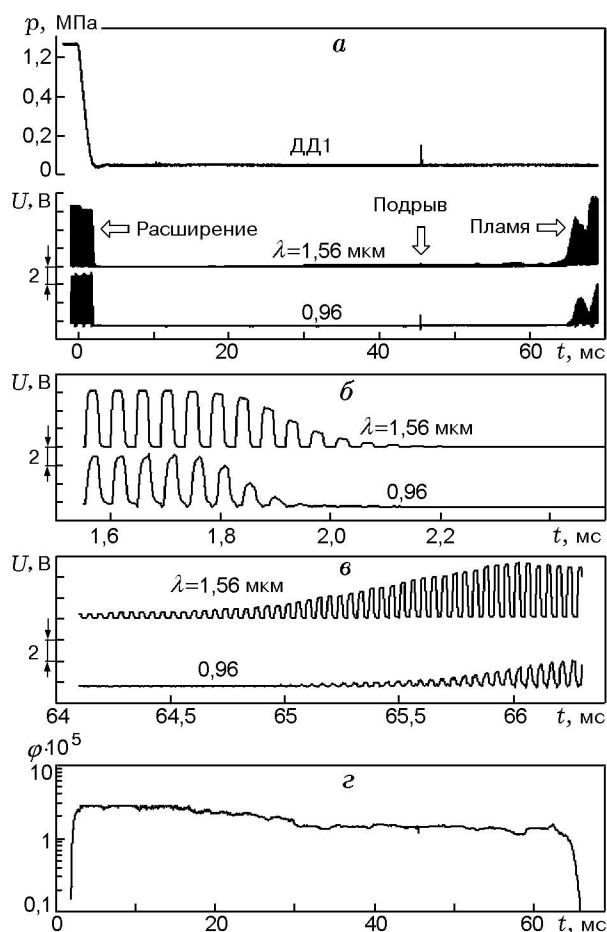


Рис. 3. Параметрический портрет взрыва в системе 30 % H_2 + воздух + туман:

a — запись сигналов давления (датчиком ДД1) и излучения (двухполосным ФД); *б* — «растянутая» запись сигналов двухполосным ФД на стадии расширения; *в* — «растянутая» запись сигналов двухполосным ФД на стадии горения; *г* — изменение объемной доли микрокапель

рассчитывается по следующему неявному выражению:

$$p_v = p - \left(\frac{p_1}{p_{v1}} - 1 \right) \left(p_v + \frac{\varphi}{\mu_v} \rho_l R \frac{2238}{11 - \lg p_v} \right).$$

Здесь μ_v — молекулярная масса воды, ρ_l — плотность воды в жидкой фазе, R — универсальная газовая постоянная. Для описанных опытов давление смеси в момент поджигания равно $p = p_0 = 0,1$ МПа, а температура смеси не превышает 373 К. В интервале температур $273 < T < 373$ К плотность воды изменяется незначительно ($958,3 < \rho_l < 999,9$ кг/м³) и в расчетах можно брать значение $\rho_l \cong 979$ кг/м³. Соотношение для p_v не содержит молекуляр-

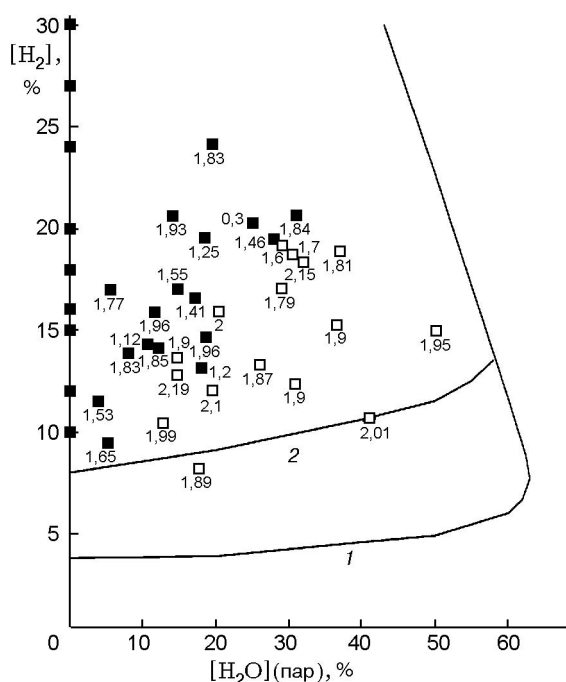


Рис. 4. Пределы горения смесей водород + воздух + насыщенный пар + микрокапли в зависимости от объемной концентрации пара:

темные точки — эксперименты с распространением пламени, светлые — без воспламенения, цифры под точками — объемная доля микрокапель ($\times 10^5$); 1 — распространение пламени вверх по данным [18], 2 — распространение пламени вниз по данным [18]

ную массу несущего газа, которая зависит от содержания водорода в смеси с воздухом. Таким образом, начальные условия эксперимента (величины p_1 , p_{v1} и измеряемое значение объемной доли жидкой фазы φ) достаточны для расчета объемного содержания насыщенного пара в смеси водород + воздух + насыщенный пар + микрокапли воды (туман).

По результатам оптических измерений определены параметры тумана: объемная доля капель $5 \cdot 10^{-6} \leq \varphi \leq 2,2 \cdot 10^{-5}$, диаметр микрокапель $\approx 1,5 \pm 0,5$ мкм, массовая доля пара в смеси $\leq (45 \pm 5) \%$, массовая доля микрокапель $\leq (2 \pm 0,2) \%$.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ВЫВОДЫ

Использованная методика позволила выявить влияние микрокапель на пределы распространения пламени в смесях водород + воздух + насыщенный пар. Смесь считалась негорючей, если фотодиоды не регистрировали излучение в течение 0,4 с после зажигания.

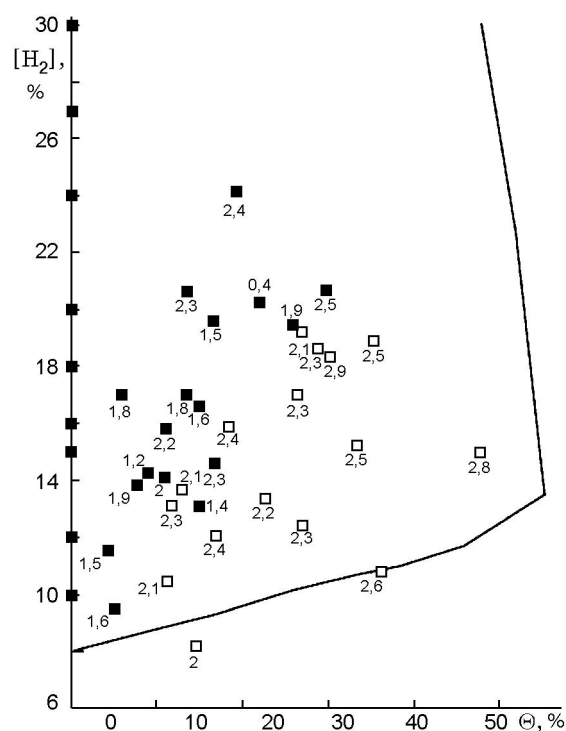


Рис. 5. Пределы горения смесей водород + воздух + насыщенный пар + микрокапли в зависимости от массовой концентрации воды (в виде пара и микрокапель):

темные точки — эксперименты с распространением пламени, светлые — без воспламенения, цифры под точками — массовое содержание микрокапель (в процентах к массе всей смеси), линия — распространение пламени вниз по данным [18]

На рис. 4 представлены результаты опытов по распространению пламени в системе водород + воздух + насыщенный пар + микрокапли. Значения объемных концентраций взяты по отношению ко всей смеси и соответствуют условиям в момент зажигания. Темными точками обозначены случаи с распространением пламени, светлыми — отсутствие воспламенения. Под каждой точкой приведены измеренные значения объемной доли микрокапель ($\varphi \cdot 10^5$). Линии отвечают пределам распространения пламени в смесях водород + воздух + водяной пар по данным работы [18] при распространении пламени вверх и вниз. Сравнение результатов [18] с полученными данными показывает, что при наличии микрокапель пределы горения системы водород + воздух + водяной пар сужаются и смещаются в сторону более низких значений объемной концентрации пара.

Представление результатов в выбранной на рис. 4 системе координат (объемная концентрация водорода — объемная концентрация насыщенного пара) не отвечает на вопрос о роли капель, поскольку объемная концентрация пара не отражает суммарного содержания воды (пар + капли). Целесообразнее представлять результаты так, как это сделано на рис. 5 — в координатах «объемная концентрация водорода — массовая концентрация воды (в виде пара и капель)». Видно сужение области распространения пламени несмотря на снижение концентрации пара в объеме из-за конденсации.

Таким образом, проведенные эксперименты показали, что микрокапли размером $1,5 \div 2$ мкм, образующиеся при конденсации насыщенного пара в результате быстрого расширения, не только компенсируют отвод пара из системы, но и эффективно подавляют взрывные явления в водородовоздушных смесях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Lefebvre A. H. Atomization and sprays. New York: Hemisphere Publ. Corp., 1989.
2. Hayashi S., Kumagai S. Flame propagation in fuel droplet-vapor-air mixtures // Proc. 15th Symp. (Intern.) on Combustion. Pittsburgh, PA: Combustion Inst., 1974. P. 445–452.
3. Tsai S. S., Liparulo N. J. Fog inerting criteria for hydrogen-air mixtures // Proc. 2nd Intern. Conference on Hydrogen Impact on Water Reactor Safety. NUREG/CP 0038. Albuquerque, N. M., 1982. P. 727–739.
4. Glass I. I., Patterson G. N. A theoretical and experimental study of shock tube flows // J. Aerospace Sci. 1953. V. 22, N 2. P. 73–100.
5. Kawada H., Mory Y. A shock tube study on condensation kinetics // Bull. JSME. 1973. V. 16, N 97. P. 1053–1065.
6. Barschdorf D. Carrier gas effects on homogeneous nucleation of water vapor in a shock tube // Phys. Fluids. 1975. V. 18, N 5. P. 529–533.
7. Kotake S., Glass I. I. Condensation of water vapor in rarefaction waves: Homogeneous nucleation // AIAA J. 1977. V. 14, N 12. P. 1731–1737.
8. Kotake S., Glass I. I. Condensation of water vapor in rarefaction waves: Heterogeneous nucleation // AIAA J. 1977. V. 15, N 2. P. 215–221.
9. Glass I. I., Kalra S. P., Sislian J. P. Condensation of water vapor in rarefaction waves: Experimental results // AIAA J. 1977. V. 15, N 5. P. 686–693.
10. Hastings D. L., Hodson J. P. The formation of an aqueous fog in a shock tube // J. Phys. D: Appl. Phys. 1979. V. 12, N 12. P. 2111–2122.
11. Smolders H. J., Willems J. F. H., de Lange H. C., van Dongen M. E. H. Wave induced growth and evaporation of droplets in a vapor-gas mixture // 17th Symp. (Intern.) on Shock Waves and Shock Tubes. A.I.P. Conf. Proc. V. 208 / Ed. by Y. W. Kim. Bethlehem, PA, 1989. P. 802–807.
12. Smolders H. J. Non-linear wave phenomena in gas-vapor mixture with phase transition: Ph. D. Thesis. Eindhoven, Univ. of Technol., 1992.
13. Looijmans K. N. H., Kriesels P. C., van Dongen M. E. H. Gasdynamic aspects of modified expansion shock tube for nucleation and condensation studies // Experiments in Fluids. 1993. V. 15, N 1. P. 61–64.
14. Looijmans K. N. H., Willems J. F. H., van Dongen M. E. H. On the principle, design and performance of an expansion-shock tube for nucleation studies // Proc. 19th Symp. Shock Waves, Marseille / R. L. Brun, L. Dumitrescu (Eds). 1995. V. 1. P. 215–220.
15. Левашенко Г. И., Симоньков С. В., Анцулевич В. И. Определение размеров и содержания частиц сажи в продуктах сгорания керосина // Физика горения и взрыва. 1986. Т. 22, № 6. С. 108–112.
16. Долганин Ю. Н., Завьялов В. М., Козлов Ю. К. и др. Пирометр спектрального отношения для измерения истинной температуры углеродистых сталей // Измерит. техника. 1997. № 1. С. 23–25.
17. Medvedev S. P., Gelfand B. E., Zhukov V. V., et al. Study of turbulent combustion of hydrogen-air-steam-water fog mixtures prepared by sudden expansion technique // CD-ROM Proc. of 17th ICDERS. Heidelberg Univ., Germany, July 2–30, 1999. Paper № 025.
18. Kumar R. K. Flammability limits of hydrogen-oxygen-diluent mixtures // J. Fire Sci. 1985. V. 3. P. 245–262.

Поступила в редакцию 10/VII 2001 г.