

1 атм) датчики выдерживают около 10 нагружений: верхний слой эпоксидной смолы выгорает. После ремонта посредством дополнительной заливки они восстанавливают свои тарировочные данные.

Полученное совпадение статической и динамической тарировок подвергает сомнению данные авторов [4] о зависимости пьезомодуля керамики ЦТС-19 при давлениях до 100 атм и временах $2 \cdot 10^{-6}$ — 10^{-1} с от времени нагружения. По-видимому, в экспериментах [4] наблюдалась значительная утечка заряда с кварцевых датчиков, поскольку параллельно датчикам дополнительная емкость не ставилась и входное сопротивление осциллографа составляло лишь 1 МОм.

Отметим, что статическая тарировка датчиков с волноводным стержнем, залитых воском [2], показала их значительный гистерезис (до 30%), т. е. с помощью «восковых» датчиков можно достоверно измерять лишь амплитуды давления ударных и детонационных волн, а не профили давлений за их фронтами.

Поступила в редакцию 17/VII 1980

ЛИТЕРАТУРА

1. С. Г. Зайцев. ПТЭ, 1958, 6, 97.
2. М. Е. Топчийн. ПМТФ, 1962, 4, 94.
3. Р. И. Солоухин. Ударные волны и детонация в газах. М.: Физматгиз, 1963.
4. Н. П. Хохлов, В. Н. Минеев и др. ФГВ, 1978, 14, 4.

УДК 541.126

ИНИЦИИРОВАНИЕ РЕАКЦИИ ФТОРА С ВОДОРОДОМ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ИМПУЛЬСНОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ПОВЕРХНОСТЬ РЕАКЦИОННОГО СОСУДА

В. Я. Агроскин, Г. К. Васильев, В. И. Гурьев, В. И. Кирьянов, О. В. Мисочко
(Черноголовка)

К настоящему времени известны многие примеры воздействия лазерного излучения на химические системы [1]. В основном лазерным излучением действуют на гомогенную среду, причем в качестве такой среды, как правило, выбирается газ. Значительно меньше работ [2—4] посвящено воздействию лазерного излучения на гетерогенные системы, хотя важность и перспективность подобного рода исследований отмечалась рядом авторов [5, 6].

В настоящей работе сообщается о найденном эффекте инициирования взрывов в смеси F_2 , O_2 , $H_2(D)_2$, находящейся выше второго предела самовоспламенения, при воздействии излучения импульсных химических HF- или DF— CO_2 -лазеров на поверхность реакционного сосуда (флюорит, кварц, тефлон, фтористый барий, медь). Подобный эффект мог бы представляться почти очевидным, поскольку воздействие лазерного излучения на поверхность может приводить к сильному разогреву и разрушению поверхности, образованию плазмы и т. д. [7], однако пороговые плотности энергии (мощности) оказались достаточно низкими, что исключает простой термический механизм возбуждения взрыва.

Схема экспериментальной установки, состоящей из лазера (HF- или DF— CO_2), кюветы и системы регистрации, показана на рис. 1. Входное окно кюветы отделяли от смеси пробкой инертного газа. Излучение направлялось на пластины, расположенные в зоне смеси перпендикулярно пучку. Возбуждение взрывов фиксировалось емкостным датчиком давления. В ходе экспериментов обнаружено, что при плотностях энергии (мощности) больше некоторой в смесях возбуждались взрывы, причем в пределах точности эксперимента пороговые плотности энергии (мощности) не зависели от природы облучаемого материала.

Основные эксперименты проводились с фторводородной смесью состава $F_2 : O_2 : H_2(D_2) = 10 : 5 : 3$, приготовленной при полном давлении $p = 0,2$ атм. Пороговая плотность энергии (мощности) в этом случае оказалась равной ~ 400 мДж/см² (~ 300 кВт/см²) при воздействии излучения HF-лазера. Изменение давления кислорода, который стабилизирует инициируемую смесь [8], приводило, как и следовало

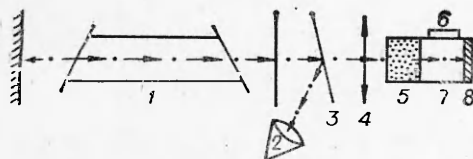


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

1 — лазер; 2 — калориметр; 3 — отклоняющая пластинка; 4 — линза; 5 — пробка инертного газа; 6 — датчик давления; 7 — реакционный объем; 8 — облучаемая поверхность.

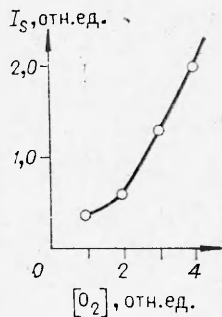


Рис. 2. Влияние давления кислорода на пороговую плотность инициирования.

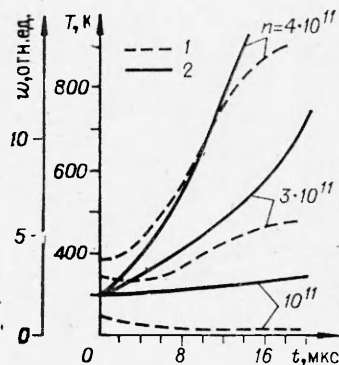


Рис. 3. Изменение во времени скорости химической реакции (1) и температуры (2) в приповерхностном слое.

ожидать, к пропорциональному изменению пороговых плотностей излучения (рис. 2).

В некоторых опытах использовалось излучение импульсного DF — CO₂-лазера. При этом цилиндрический столб смеси F₂ : H₂(D₂) : He : O₂ = 15 : 5 : 78 : 2 при $p = 1$ атм помещался между двумя воздушными пробками. Излучение лазера направлялось в кювету так, что оно лишь слегка касалось стенок. Оцененные пороговые плотности мощности в этом случае оказались равными ~ 100 кВт/см². Если инициирующее излучение проходило через кювету, не встречая на пути поверхность, то смеси оставались стабильными при мощностях, по крайней мере на два порядка больших.

Переходя к обсуждению вопроса о природе взрыва, оценим прежде всего возможную величину разогрева поверхности при воздействии импульсного лазерного излучения. Считая с большим запасом, что 1—10% падающей энергии поглощается в поверхностном слое $\sqrt{\chi\tau} \approx 10^{-3}$ см (χ — коэффициент температуропроводности, τ — длительность лазерного импульса), получаем величину разогрева $\Delta T \sim (2 \div 20)^\circ\text{C}$. Аналогичная оценка получается из экстраполяции данных о порогах разрушения твердых поверхностей под действием лазерного излучения, которые лежат в диапазоне 10^8 — 10^9 Вт/см² (развиваемые при этом температуры близки к температурам плавления). Столь малые разогревы, существующие менее 10^{-5} с, не могут быть причиной взрыва.

Представляется, что взрыв инициируется вследствие поглощения излучения и неравновесного разогрева поверхностной пленки из адсорбированных молекул HF(DF), H₂O и др. При этом в пленке происходит неравновесная диссоциация молекул и в прилегающий слой смеси вбрасываются атомы или радикалы (например F, H, OH), инициирующие реакцию в этом слое. Дальнейшее распространение волны горения идет по тепловому механизму — термическая диссоциация молекул F₂.

Для проверки этой гипотезы проводился численный расчет следующей модели. В точке $x = 0$ (одномерная задача) происходит мгновенное впрыскивание активных центров в слой толщиной $\delta x = \sqrt{D\tau}$ (D — коэффициент диффузии). В предположении диффузионной теплопроводности из балансных уравнений рассчитывались скорости химической реакции и разогревы через промежутки времени $\Delta t = 1$ мкс при варьировании числа активных центров n , инжектированных с единицы поверхности. Результаты расчета приведены на рис. 3, где показаны временная эволюция скорости химической реакции и температуры реагирующей смеси вблизи поверхности. Видно, что при $n = 3 \cdot 10^{11}$ 1/см² скорость реакции начинает расти во времени и температура стремится к бесконечности, что соответствует критическому условию. Критичность возникает в результате конкуренции процессов тепловода и гибели активных центров, с одной стороны, и тепловыделения в химической реакции первоначально инжектируемых активных центров — с другой. Реально перенос тепла происходит быстрее, что приводит к увеличению $n_{\text{кр}}$ до $\approx 10^{12}$ 1/см².

Далее рассмотрим, при каких условиях неравновесного разогрева пленки можно получить соответствующую величину концентрации активных центров ($\approx 10^{15}$ см⁻³) в слое $\approx \sqrt{D\tau} = 10^{-3}$ см (смесь при $p = 0,2$ атм). Будем считать, что вероятность диссоциации молекулы в поверхностном слое и вылета активного центра в объем $P = \nu \exp(-Q/RT_{\text{к}})$, где ν — частота колебаний; Q — энергия диссоциации (в адсорбированном состоянии, как правило, меньше энергии связи); $T_{\text{к}}$ — неравновесная колебательная температура пленки.

$$T_{\text{к}}^{-1} = \frac{k}{h\omega} \ln \left(1 + \frac{1}{\varepsilon} \right),$$

где ε — величина среднего кванта, для которой в условиях воздействия лазерного излучения можно написать уравнение $d\varepsilon/dt = f\sigma I - \varepsilon/\tau$; f — доля молекул слоя, находящихся в резонансе с частотой излучения мощности I ; σ — сечение поглощения; τ — характеристическое время переноса энергии в подложку. Поскольку длительность импульса больше величины $\tau \approx 10^{-7} \div 10^{-8}$ с [9], можно считать $\varepsilon \approx f\sigma I\tau$. Полное число диссоциированных молекул с поверхности 1 см² должно быть равным $10^{12} = pN_a\tau$ ($N_a \approx 10^{16}$ см⁻² — концентрация адсорбированных молекул). Отсюда $p = 10^2$ 1/с, а необходимая величина $T_K \sim 2000$ К (для энергии диссоциации взято значение 100 ккал/моль, что соответствует $\varepsilon = 0,1$). Отсюда получаем $f\sigma = 2 \cdot (10^{-10} \div 10^{-18})$, что согласуется с оценкой работы [5].

Таким образом, проведенный упрощенный анализ показывает, что рассмотренный механизм воспламенения смеси за счет поставки активных центров из неравновесно возбужденного адсорбированного слоя вполне реален.

Поступила в редакцию 13/III 1981

ЛИТЕРАТУРА

1. В. Н. Панфилов, А. К. Петров. — В сб.: Химия плазмы, № 6. М.: Атомиздат, 1979.
2. М. N. Djidjoev, R. V. Khokhlov et al. — In: Tunable Lasers and Applications. Springer — Verlag, 1976.
3. M. E. Umstead, M. C. Lin. J. Phys. Chem., 1978, 82, 18, 2047.
4. К. С. Гочелашвили, И. В. Карлов и др. Письма в ЖЭТФ, 1975, 21, 11, 640.
5. В. И. Гольданский, В. А. Намят, Р. В. Хохлов. ЖЭТФ, 1976, 70, 6, 2349.
6. Н. В. Карлов, А. М. Прохоров. УФН, 1976, 118, 4, 583.
7. Д. Рэди. Действие мощного лазерного излучения. М.: Мир, 1974.
8. Г. А. Капралова, Е. М. Марголина, А. М. Чайкин. Докл. АН СССР, 1971, 198, 3, 634.
9. V. I. Egorov, Yu. M. Gershenzon et al. Chem. Phys. Lett., 1973, 20, 1, 77.

УДК 622.235.5

ОПТИМАЛЬНЫЕ ВВ ДЛЯ РАЗГОНА ТЕЛ

Н. П. Пурьгин, С. В. Самылов, И. В. Санин

(Челябинск)

В литературе по физике взрыва рассматриваются различные аспекты проблемы метания тел продуктами взрыва (ПВ) (например, [1, 2]). В частности, представляет интерес задача о минимизации энергии заряда ВВ для разгона тела по заданной скорости. В [1], по существу, содержится решение этой задачи для плоской несжимаемой пластины и степенного уравнения состояния ПВ (при иницировании заряда с открытого торца), хотя в явном виде такая задача не сформулирована. В этой работе получен важный вывод, заключающийся в том, что энергия пластины практически определяется только калорийностью ВВ и отношением масс пластины и заряда ВВ.

Из формул, приведенных в [1], для кубического уравнения состояния ПВ (в дальнейшем будем рассматривать только этот случай) и неограниченной базы разгона путем алгебраических преобразований можно получить

$$E_{ВВ} = (27/128)Mu^2\omega^3/(\omega - 1)^2, \quad (1)$$

где $E_{ВВ}$ — энергия заряда ВВ, необходимая для разгона пластины массой M до скорости u ; $\omega = D/lu$; D — скорость детонации ВВ. При фиксированных значениях M и u $E_{ВВ} \sim f(\omega)$ и из (1) легко найти, что $E_{ВВ}$ имеет минимум при $\omega = 3$, т. е. при $D = 3u$.

Таким образом, минимальная затрата энергии заряда ВВ для разгона пластины имеет место только в том случае, когда скорость детонации ВВ втрое превышает скорость пластины. Такое ВВ можно считать оптимальным в смысле минимальной затраты энергии для разгона пластины до заданной скорости.