

СРОЧНЫЕ СООБЩЕНИЯ

ЭФФЕКТ МАРАНГОНИ
ПРИ ГОРЕНИИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ
С ЖИДКИМ СЛОЕМ НА ПОВЕРХНОСТИ

УДК 536.46

Л. К. Гусаченко, В. Е. Зарко

Институт химической кинетики и горения СО РАН,
630090 Новосибирск

Показано, что известный механизм движения пузырей под действием градиента поверхностного натяжения может обеспечить эффективный вывод газообразных продуктов из зоны реакции к-фазы плавящихся энергетических материалов, где существует очень высокий градиент температуры. Учет этого эффекта позволяет правдоподобно объяснить появление пены на поверхности некоторых энергетических материалов при резком отключении светового потока, ранее поддерживавшего горение.

Эффект Марангони. Рассмотрим термокапиллярный эффект, вызванный зависимостью поверхностного натяжения σ от температуры T [1]. Для многих однокомпонентных жидкостей (вода, органические вещества, расплавы солей, жидкие металлы) в широком интервале температур (но вдали от критической точки) выполняется условие $d\sigma/dT \approx 1,0 \cdot 10^{-4}$ Н/(м · К) = 0,1 г/(с² · К) [2]. Это обуславливает движение газового пузырька радиуса R в «горячую» сторону со скоростью $v_M = -(R/3\mu)(d\sigma/dT)\nabla T$ [3, 4]. Здесь μ — вязкость жидкости. Принято число Рейнольдса $Re \ll 1$.

Оценка действия эффекта при горении дины. Визуальные наблюдения и киносъемка при атмосферном давлении показали [5, 6], что на поверхности горящего образца прессованной дины имеется жидкий слой толщиной ~ 3 мм, в котором происходит интенсивная конвекция, вызванная подъемом пузырей. Оценим вклад эффекта Марангони в скорость этого подъема. Выталкивающая (архимедова) сила $(4/3)\pi R^3 \rho g$ при стоковском сопротивлении $6\pi\mu Rv$ дает скорость подъема пузыря $v_{Ar} = (2/9)\rho g R^2/\mu$ (здесь R — радиус пузыря, ρ — плотность, g — ускорение силы тяжести). Отсюда $v_M/v_{Ar} = 1,5(-d\sigma/dT)\nabla T/\rho g R$. Плотность дины 1,67 г/см³, температуры плавления и поверхности 50 и 240 °С соответственно. Верхнюю оценку R можно получить по помещенной в [5] фотографии поверхности ($R \approx 0,5 \div 0,7$ мм). Тогда $v_M/v_{Ar} \approx 0,8 \div 1$. Ясно, что при повышенном давлении, когда градиент температуры возрастет, а размер пузырька уменьшится, эффект Марангони может стать главной причиной движения пузырьков.

Удаление газообразных продуктов подповерхностных реакций. Использование представлений о конвекции в жидкой пленке, вызванной движением пузырьков под действием эффекта Марангони, позволяет устранить слабое место современных моделей горения, связанное с объяснением отсутствия пены при удалении газообразных продуктов подповерхностных реакций разложения к-фазы. Действительно, коэффициент молекулярной диффузии растворенного газа (и мелких зародышей новой фазы) в жидкости очень

мал, продукты реакции по этому механизму из жидкого слоя практически не выводятся. Известно, что для многих энергетических материалов степень разложения в жидкой фазе много больше предела растворимости в ней этих продуктов. В этом случае они должны выделяться в виде пены, но в ряде экспериментов пена не наблюдалась при довольно большой степени разложения.

Кажущееся противоречие устраняется учетом эффекта Марангони, который вызывает движение газовых пузырьков, которые, в свою очередь, вызывают конвекцию жидкого слоя. Конвективная диффузия способствует увеличению скорости вывода растворенных продуктов реакции, при этом некоторая их часть удаляется из слоя в пузырьках.

Все вышесказанное позволяет правдоподобно объяснить вспенивание при резком отключении светового потока, ранее поддерживавшего горение. В таком процессе происходит быстрое уменьшение градиента температуры, сначала в очень узкой зоне у поверхности, затем во все более широкой области, где прекращается эффективный вывод растворенного газа. И поскольку реакции еще какое-то время поставляют газ и продолжается подвод пузырьков из зоны сильного градиента, на поверхности накапливаются и растут пузырьки, т. е. образуется пена.

Итак, эффект Марангони, вероятно, играет важную роль в механизме горения твердых топлив с разжиженным приповерхностным слоем. Инструментом для выяснения его конкретного действия могут быть опыты с перегрузками и с детальной визуализацией горящей поверхности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Scriven L. E., Sternling C. V. The Marangoni effects // Nature. 1960. V. 187, N 4733. P. 186-188.
2. Григорьева И. С., Мейлихова Е. З. Физические величины: Справочник. М.: Энергоатомиздат, 1991.
3. Кузнецов В. М., Луговцов Б. А., Шер Е. И. О движении газовых пузырьков в жидкости под действием градиента температуры // ПМТФ. 1966. № 1.
4. Young N. O., Goldstein L. S., Block M. J. The motion of bubbles in a vertical temperature gradient // J. Fluid Mechanics. 1959. V. 6. P. 3.
5. Максимов Э. И., Максимов Ю. М., Чуков В. Ф. Исследование горения динитроксиэтилнитрамина // Физика горения и взрыва. 1971. Т. 7, № 2. С. 197-204.
6. Александров В. В., Болдырева А. В., Болдырев В. В., Тухтаев Р. К. Горение динитро при атмосферном давлении // Физика горения и взрыва. 1973. Т. 9, № 1. С. 140-142.

Поступила в редакцию 4/Х 1995 г.
