

отражая зависимость ее от доли поверхности трубы, смоченной топливом, включая и существование предела распространения детонации.

Протяженность зоны детонации возрастает с уменьшением k и на несколько порядков превышает протяженность зоны реакции гомогенной детонации в соответствующей парогазовой смеси. При этом толщина пограничного слоя нарастает. Однако оценка удвоенной толщины пограничного слоя, проведенная по формуле (6), показывает, что в точке расположения плоскости Чепмена — Жуге пограничные слои не смыкаются. Скорость распространения детонации меньше скорости детонации в гомогенной смеси соответствующего состава. Причина заключается в неполном сгорании топлива, испарившегося с поверхности пленки, в относительно больших потерях в зоне волны гетерогенной детонации и диссоциации продуктов реакции в окрестности поверхности диффузионного пламени. Последнее утверждение, по-видимому, косвенно подтверждается малым значением показателя адиабаты γ_* .

Поступила в редакцию 21/V 1981

ЛИТЕРАТУРА

1. M. R. Loison. Comptes Rendus, 1952. 234, 15.
2. В. Ф. Комов, Я. К. Трошин. Докл. АН СССР, 162, 4.
3. В. Ф. Комов, Я. К. Трошин. Докл. АН СССР, 1967, 175, 1.
4. С. А. Лесняк, М. А. Назаров и др. Докл. АН СССР, 1968, 182, 5.
5. С. А. Лесняк, М. А. Назаров и др. Докл. АН СССР, 1968, 183, 3.
6. П. И. Зверев, В. М. Гендугов, Н. И. Зверев. ФГВ, 1975, 11, 6.
7. В. М. Гендугов. ФГВ, 1978, 14, 4.
8. К. Регланд, И. А. Николас. РТК, 1969, 7, 5.
9. C. Rao, M. Sichel, I. Nicholls. Comb. Sci. Techn., 1972, 6, 5.
10. С. А. Лесняк, В. Г. Слуцкий. ПМТФ, 1974, 3.
11. С. А. Лесняк, В. Г. Слуцкий. ПМТФ, 1975, 4.
12. В. М. Гендугов. ФГВ, 1979, 15, 5.
13. В. М. Гендугов. ФГВ, 1978, 14, 2.
14. В. М. Гендугов. ФГВ, 1979, 15, 2.
15. Ф. А. Вильямс. Теория горения. М.: Наука, 1974.

УДК 662.215.1+621.726

УЧЕТ ПЛАВЛЕНИЯ ЧАСТИЦ ПРИ ДЕТОНАЦИОННОМ НАПЫЛЕНИИ

Е. И. Карпиловский
(Москва)

Экспериментально установлено [1, 2], что качественное покрытие образуют только частицы, вступающие в контакт с подложкой в расплавленном состоянии. Это связано с тем, что, хотя на выходе из ствола частицы имеют большую скорость, они сильно тормозятся отраженной ударной волной, располагающейся вблизи поверхности папыляемого материала, и их кинетической энергии недостаточно для преодоления прочностных характеристик металлов и образования прочного сцепления с подложкой.

В связи с этим весьма актуальным становится вопрос о механизме плавления твердых частиц в стволе детонационной установки и характерных параметрах, его определяющих.

В данной работе задача об истечении смеси твердых частиц с продуктами детонации из ствола детонационной установки решалась в постановке [3] с той разницей, что учитывался процесс плавления частиц. При этом считалось, что частицы начинают плавиться лишь после полного прогрева до температуры плавления и процесс плавления начинается на поверхности и распространяется в глубь частицы.

Для оценки степени плавления вводится радиус нерасплавленной зоны r , который может изменяться от начального r_0 до $0,2 r_0$. Вести численный расчет до $r = 0$ нельзя ввиду расходимости правой части дифференциальных уравнений. Поэтому считалось, что все частицы, радиус нерасплавленной зоны которых становится равным $0,2 r_0$, полностью расплавлены.

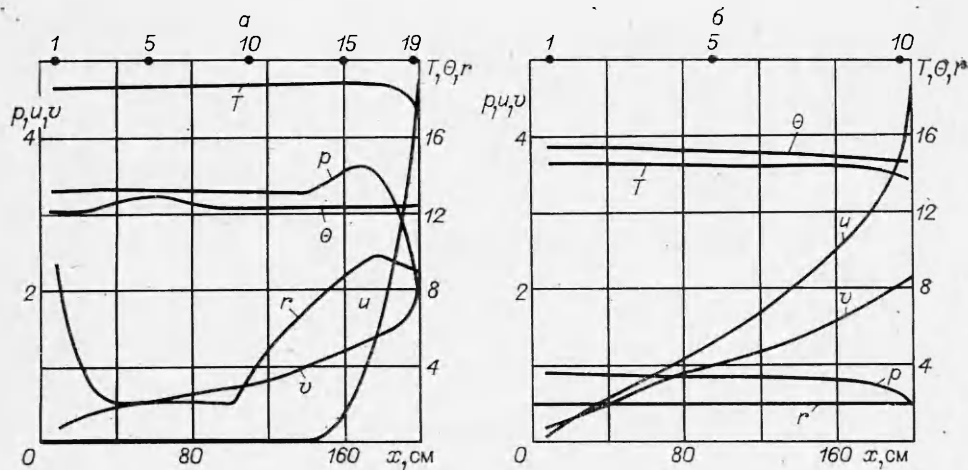


Рис. 1.

Изменение радиуса нерасплавленной зоны описывалось следующим дифференциальным уравнением:

$$\partial r / \partial t + v \cdot \partial r / \partial x = -C_0 C, \quad (1)$$

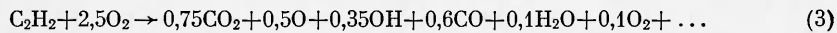
где

$$C = \text{Nu} \cdot (T - \Theta_n) / r^2. \quad (2)$$

Здесь r — радиус нерасплавленной зоны; t — время; x — пространственная координата; v — скорость частиц; Nu — число Нуссельта; T — температура газа; Θ_n — температура плавления частиц; C_0 — коэффициент, полученный при приведении уравнения к безразмерному виду.

Уравнение (1) решалось совместно с подсистемами (1)–(3) и (4)–(6) из [3] методом предиктор — корректор, описанным в [4]. Для изучения влияния начального положения частиц в стволе детонационной установки весь ствол разбивался по длине на 20 одинаковых сечений и в центре каждого помещалась меченая частица, параметры и координата которой через определенные промежутки времени выводились на печать. Это позволяет следить также и за передвижением всех частиц, занимавших первоначально определенный участок ствола вблизи меченой частицы, и фиксировать их параметры как при движении внутри ствола, так и на его выходе.

Численные расчеты проводились для стехиометрической смеси ацетилена с кислородом при $T = 300$ К и атмосферном давлении, в которой равномерно распределены твердые сферические частицы радиусом r_0 . Химическая реакция, протекающая на фронте детонационной волны, описывается уравнением [5]



Скорость детонации смеси $D = 2430$ м/с, отношение удельных теплоемкостей продуктов реакции $\gamma = 1,15$. Коэффициенты кинематической вязкости и теплопроводности газа, входящие в числа Нуссельта и Рейнольдса, имели следующие значения: $\nu = 8,5 \cdot 10^{-5}$ м²/с, $\lambda = 0,32$ Вт/(м·К).

В расчетах использовались частицы окиси алюминия с плотностью $\rho = 3965$ кг/м³, удельной теплоемкостью $C = 135$ кДж/(кмоль·К) и теплотой плавления $q = 10^6$ Дж/кг. Параметры ствола детонационной установки: $l = 2$ м, $d = 0,025$ м. Потерями тепла на трение и теплообмен между продуктами детонации и стенкой ствола пренебрегалось, так как эти потери не превышают нескольких процентов [6].

Результаты численного расчета приведены на рис. 1, 2. На рис. 1, а, б изображено распределение безразмерных параметров газа (p — давление, T — температура, u — скорость) и частиц (v — скорость, Θ — температура, r — радиус непроплавленной частицы) внутри ствола детонационной установки и на ее выходе в моменты времени $t = 0,4$ и $t = 4$ мс соответственно, а на рис. 2 — радиус нерасплавленной зоны.

Для получения реальных значений представленных параметров их необходимо умножить на соответствующие размерные эталоны: $u^* = v^* = 250$ м/с, $p^* = 3,4 \cdot 10^5$ Н/м², $\Theta^* = T^* = 190$ К, $r^* = 0,1 r_0$.

На рис. 1 отсчет времени ведется начиная с момента выхода фронта детонационной волны на правый открытый конец ствола, причем по оси абсцисс внизу отложено расстояние от левого закрытого конца ствола, а сверху точками показано положение некоторых меченых частиц, находящихся внутри ствола. На рис. 1, а пред-

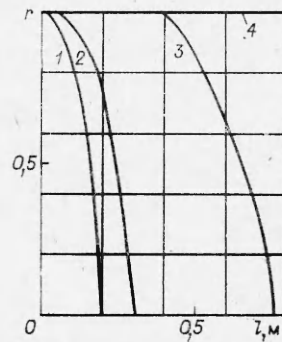


Рис. 2.

ставлены результаты численного расчета для частиц окиси алюминия начального радиуса $r_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ м с объемной концентрацией $K = 10^{-4}$ 1/м³. Из рис. 1, а видно, что все частицы уже достигли температуры плавления. Плавление происходит неравномерно: частицы, лежащие в области между третьей и девятой мечеными частицами, уже полностью расплавились, а частицы, лежащие вблизи семнадцатой частицы, только начинают плавиться. В процессе плавления температура частиц остается постоянной и начинает снова расти после того, как частицы переходят в полностью расплавленное состояние.

Волна разрежения, продуцированная открытым концом ствола, начинает входить в ствол детонационной установки и к данному моменту времени ее голова находится на расстоянии 0,30 м от открытого конца ствола. Проникая в ствол детонационной установки, волна разрежения приводит к увеличению скорости газа в направлении открытого конца и уменьшает его температуру. Наконец наступает такой момент, когда температура газа становится ниже температуры частиц, что приводит к охлаждению и затвердеванию уже расплавившихся частиц. Этот процесс изображен на рис. 1, б.

Из рис. 1, б видно, что температура газа по всей длине ствола стала ниже температуры частиц, что должно привести к охлаждению частиц. Правда, в данном случае температура газа остается все еще выше температуры плавления частиц, и они не затвердевают (частичное плавление и обратное затвердевание частиц такого радиуса получено при $K = 4 \cdot 10^{-4}$ 1/м³). К моменту $t = 4$ мс все частицы, занимавшие первоначально правую половину ствола, уже вышли из него, а остальные находятся в полностью расплавленном состоянии.

Состояние частиц на выходе из ствола в зависимости от их начального радиуса, концентрации и глубины загрузки изображено на рис. 2. Здесь по оси ординат отложен безразмерный радиус нерасплавившегося ядра, а по оси абсцисс — глубина загрузки частицы в ствол детонационной установки ($1 - r_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ м, $K = 10^{-4}$ 1/м³; $2 - r_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ м, $K = 2 \cdot 10^{-4}$ 1/м³; $3 - r_0 = 4 \cdot 10^{-5}$ м, $K = 10^{-4}$ 1/м³; $4 - r_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ м, $K = 4 \cdot 10^{-4}$ 1/м³).

Из представленных результатов видно, что частицы с $r_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ м и $K = 4 \cdot 10^{-4}$ 1/м³ не плавятся ни при какой глубине загрузки. Это обусловлено сильным охлаждением частицами газа, температура которого падает ниже температуры плавления. При данной концентрации не будут плавиться частицы любого радиуса, поэтому концентрацию частиц $4 \cdot 10^{-4}$ 1/м³ можно считать предельной при напылении частиц окиси алюминия при их равномерном начальном распределении по длине ствола.

Рис. 2, 3 показывает, что частицы начального радиуса $r_0 = 4 \cdot 10^{-5}$ м приобретают расплавленное состояние только при глубине их загрузки в ствол не менее 0,7 м. Поэтому при использовании для напыления частиц радиусом более $4 \cdot 10^{-5}$ м их необходимо загружать на глубину, превышающую длину ствола современных детонационных установок, равную 1—2 м. Таким образом, при напылении частиц окиси алюминия можно установить предельные значения для начального радиуса $r_0 < 5 \cdot 10^{-5}$ м, а для концентрации $K < 4 \cdot 10^{-4}$ 1/м³.

Итак, численные расчеты показали, что определяющее влияние на процесс плавления частиц в стволе детонационной установки оказывают три параметра: начальный радиус частиц r_0 , начальная концентрация K и глубина загрузки l . Обычная глубина загрузки современных детонационных установок не превышает 0,5—1,0 м. Для таких глубин загрузки существуют предельные значения начального радиуса и концентрации, выше которых частицы не могут достигать на выходе из ствола расплавленного состояния. Для частиц окиси алюминия получены следующие значения предельного начального радиуса и концентрации: $r_{пр} = 5 \cdot 10^{-5}$ м и $K_{пр} = 4 \cdot 10^{-4}$ 1/м³, что хорошо согласуется с результатами экспериментов, приведенными в [7].

Поступила в редакцию 22/VI 1981

ЛИТЕРАТУРА

1. С. С. Баргенов, А. В. Кийко и др. ФГВ, 1977, 13, 3.
2. Г. В. Самсонов, С. Ю. Шаривкер и др. Неорганические и органические покрытия. М.: Наука, 1975.
3. А. М. Гладилин, Е. И. Карпиловский, А. Д. Корнев. ФГВ, 1978, 14, 1.
4. Э. А. Антонов, А. М. Гладилин. Изв. АН СССР. МЖГ, 1972, 5.
5. С. А. Миллер. Ацетилен. Т. 1. М.: Химия, 1969.
6. А. М. Гладилин, Е. И. Карпиловский. ФГВ, 1980, 16, 3.
7. А. Н. Семенов, А. М. Григоров, Ю. П. Федько. Детонационные покрытия и их применение. М., 1977.