

## УСИЛЕНИЕ СЛАБЫХ УДАРНЫХ ВОЛН ЯЧЕИСТЫМ ПЛАМЕНЕМ

*К. И. Щелкин*  
(Москва)

В. П. Карпов показал, что слабые ударные волны (акустические колебания) усиливаются в сосуде постоянного объема, если они взаимодействуют с пламенем, имеющим ячеистую структуру. Ячеистое пламя при этом дробится и приобретает «иглообразную» структуру. В пламени, не имеющем ячеистого вида, такого рода эффекты не наблюдаются. В заключении статьи В. П. Карпов ставит вопрос о причинах раздробления ячеистого пламени при взаимодействии его с акустическими волнами.

В этой заметке делается попытка дать ответ на этот вопрос.

Ячеистое пламя неустойчиво к слабым ударным волнам, подобно турбулентному пламени, рассмотренному в [2]. Вообразим на плоской поверхности нормального пламени выпуклость, например одну ячейку. Пусть слабая ударная волна, фронт которой параллелен фронту пламени, подходит к последнему со стороны сгоревшего газа. При входе в холодный газ она будет по нему двигаться медленнее, чем по выпуклости, поскольку скорость звука в газе, заполняющем выпуклость, больше, чем в холодном газе. Если на фронте пламени имеется вогнутость, заполненная холодным газом, то ударная волна вокруг вогнутости будет двигаться быстрее, чем по ней. Она будет обтекать холодный участок, схлопываться за ним и давать кумулятивный выброс. Аналогичные явления наблюдаются и при переходе ударной волны из холодного газа в горячий.

Если выпуклостей и впадин много (ячеистое пламя), то ударная волна диспергируется. При этом возникает помимо обтекания холодных участков еще ряд процессов, характерной особенностью которых оказывается появление поперечных (а при обтекании и продольных) составляющих скорости потока газа в ударной волне. Иными словами, во фронте ударной волны газ турбулизируется. Масштаб турбулентности будет порядка масштаба ячеек пламени и меньше. Турбулентность увеличивает скорость пламени, вследствие этого в нем рождается новая ударная волна.

Для крупномасштабной турбулентности в [2] получена очень грубая (за невозможностью получить более точную и в то же время простую) зависимость прироста местной скорости пламени от интенсивности падающей ударной волны:

$$\Delta u = \frac{1}{c_x + c_r} \frac{w_r}{M} = \frac{1}{\gamma} \frac{c_r}{c_x + c_r} \frac{1}{M} \Delta p, \quad (1)$$

где

$$\Delta u = \frac{u^* - u}{u}; \quad \Delta p = \frac{p^* - p}{p}; \quad M = \frac{u}{c_x}; \quad \gamma = \frac{c_p}{c_v}.$$

Здесь  $u$  и  $u^*$  — скорость пламени до и после воздействия на него ударной волны;  $p^*$  — давление во фронте ударной волны;  $p$  — давление смеси;  $c_x$  и  $c_v$  — скорость звука в холодном и горячем газах соответственно;  $w_r$  — скорость газа в ударной волне.

С другой стороны, с точностью до величин второго порядка малости (здесь уже совершенно строго) можно получить зависимость безразмерного перепада давления  $\Delta p$  в ударной волне, возникающей в смеси, когда безразмерная скорость пламени увеличивается на  $\Delta u$ :

$$\Delta p = \frac{c_x}{c_x + c_v} M q \Delta u. \quad (2)$$

Здесь  $q$  — отношение теплового эффекта на единицу массы к начальной внутренней энергии (без учета теплоты горения) исходного газа  $q = Q/c_v T_x$ .

Критерий усиления ударных волн пламенем вытекает из (1) и (2) по соотношению

$$\left. \frac{d \Delta p}{d \Delta u} \right|_2 > \left. \frac{d \Delta p}{d \Delta u} \right|_1. \quad (3)$$

Физический смысл выражения (3) заключается в том, что ударная волна усиливается, если пламя рождает новую ударную волну, более интенсивную, чем та, которая падает на пламя и производит ускорение горения.

Из (1), (2) и (3) легко получается критерий усиления слабой ударной волны ячеистым пламенем

$$\frac{1}{\gamma} \frac{c_x c_v}{(c_x + c_v)^2} q > 1. \quad (4)$$

В работе [2] аналогичный критерий усиления слабых ударных волн турбулентным пламенем содержит множитель, учитывающий затухание ударной волны при движении ее по газу вне турбулентного пламени. Здесь затухание учитывать, вероятно, не надо.

Для грубых оценок можно принять

$$\left( \frac{c_v}{c_x} \right)^2 \approx 1 + q.$$

Тогда (4) переходит в

$$\frac{1}{\gamma} \frac{(1 + q)^{1/2}}{[1 + (1 + q)^{1/2}]^2} q > 1 \quad (5)$$

или, когда  $q$  заметно больше единицы, в

$$\frac{1}{\gamma} \frac{q}{(2 + q^{1/2})} > 1. \quad (6)$$

Критерий (4), вероятно, ужесточен. При выводе его предполагалось, что падающая волна гибнет на пламени, а вместо нее и в резуль-

тате ее гибели рождается более сильная ударная волна. Для турбулентного пламени с более или менее широкой зоной горения это предположение, возможно, и близко к действительности. В ячеистом пламени падающая волна, скорее всего, частично сохраняется и сливается с рождающейся волной. Поэтому в правой части (4) должна стоять величина, меньшая единицы. С другой стороны, критерий (4) не учитывает затухание ударной волны, что должно несколько увеличить правую часть.

Несмотря на относительную неопределенность критерия (4), все же в согласии с ним можно ожидать появления стабильности ячеистого пламени по отношению к звуковым волнам при составах смесей, более близких к пределу, чем те, с которыми работал В. П. Карпов.

Ячеистая структура пламени, наблюдавшаяся В. П. Карповым, связана с диффузионной неустойчивостью пламени, предсказанной Я. Б. Зельдовичем и открытой в эксперименте В. И. Кокочавили на примере водорода с бромом [3]. Однако усиление слабых ударных волн в равной степени должно наблюдаться и на неоднородностях фронта нормального пламени, появление которых связано с неустойчивостью, предсказанной Л. Д. Ландау [4]. Эта неустойчивость в опытах В. П. Карпова не была достигнута. Но все сделанные выше выводы, как и критерий (4), применимы и в этом случае.

В заключение следует сказать, что критерий (4) можно рассматривать только для слабых ударных волн. Для сравнительно сильных волн необходимо учитывать нелинейные эффекты, которые можно увидеть, решая задачу численно [5].

*Поступила в редакцию  
4/II 1966*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. В. П. Карпов. ФГВ, 1965, 3, 68.
2. К. И. Щелкин. Изв. АН СССР, ОТН, 1959, 5, 86.
3. Я. Б. Зельдович. Теория горения и детонации газов. М., Изд-во АН СССР, 1944, стр. 33.
4. Л. Д. Ландау. ЖЭТФ, 1944, 14, 240.
5. К. И. Щелкин и Я. К. Трошин. Газодинамика горения. М., Изд-во АН СССР, 1963, стр. 230.