

УДК 542.5

ФИЗИЧЕСКАЯ ХИМИЯ

В. А. ГОРЕВ, П. А. ГУСЕВ, Я. К. ТРОШИН

ПОДЪЕМ И СГОРАНИЕ ОБЛАКА ВОДОРОДА В ВОЗДУХЕ

(Представлено академиком Н. М. Эмануэлем 17 II 1975)

Процесс продвижения и разбавления в спокойной воздушной среде облака газа с отличной от воздуха плотностью под действием одной гидростатической силы ранее изучался на облаках малых размеров (^{1, 2, 4}). В этой работе рассматривается поведение облака водорода с начальным объемом от 15 до 100 л. При выводе уравнения движения облака используются те же условия, что и в ранней работе авторов (⁴).

Введем обозначения: h — путь, пройденный вершиной облака, r_0 — начальный радиус облака, t — время, α — константа входа, равная отношению скорости увеличения объема воздуха к произведению скорости движения вершины на площадь поверхности облака, $k=0,5$ — коэффициент присоединенной массы, ρ_1 — плотность окружающего воздуха, ρ_0 — начальная плотность облака, g — ускорение свободного падения, V и V_0 — текущий и начальный объемы облака. Тогда в безразмерных величинах $\xi=h/r_0$, $\kappa=(1+k)\rho_1/(\rho_1-\rho_0)$, $\tau=r_0^{-1/2}g^{1/2}t$, $v=r_0^{-1/2}g^{-1/2}dh/dt$, $\sigma=V/V_0$ уравнение движения облака

$$\frac{d}{d\tau} \{ (\kappa\sigma - 1) (1 - \alpha)v \} = 1$$

дает зависимость для времени движения вершины с высотой:

$$\tau = \left[\frac{2(1-\alpha)}{\alpha} \right]^{1/2} \left\{ \frac{\kappa}{4} [(\alpha\xi + 1)^4 - 1] - \alpha\xi + 1/2 (\kappa - 1)^2 \alpha (1 - \alpha) v_0^2 \right\}^{1/2} - (1 - \alpha)(\kappa - 1)v_0, \quad (1)$$

где v_0 — начальная скорость вершины облака и $(\alpha\xi + 1)^3 = \sigma$ ввиду линейного увеличения размера облака с высотой. Было показано (⁴) хорошее приближение этой зависимости для движения водородных облаков с r_0 до 5 см.

Опыты с большими начальными объемами проводились путем наполнения водородом резиновых оболочек с последующим прорывом их сверху иглой. При этом резиновая оболочка лопалась за время, меньшее времени заметного продвижения получившегося свободного водородного облака. Наблюдение продвигающегося облака осуществлялось с помощью расположенных в плоскости оси движения на тонких натянутых струнах лепестков из папиросной бумаги, которые отклонялись вблизи двигающейся водородно-воздушной границы, что предварительно было проверено на теневой установке. Регистрация продвижения облака, его расширение со временем осуществлялась киносъемкой всех лепестков.

Данные эксперимента нанесены на плоскость безразмерных координат ξ , τ (рис. 1). Как видно, опытные точки находятся вблизи теоретической кривой, построенной по формуле (1) при $v_0=4$ и $\alpha=0,3$, которые определялись из наблюдаемого возмущения лепестков. В этих опытах с начальным объемом 70 л столь значительная начальная скорость — ~ 6 м/сек — объясняется реакцией лопающейся резиновой оболочки. Однако на поздних стадиях движения начальная скорость не оказывает существенного

влияния на характер движения. Так, из приведенных на рис. 1 расчетных кривых, построенных для $v_0=0$ и 4, видна медленно меняющаяся разница в пройденных расстояниях уже при $\tau > 1$. Более существенное влияние на характер движения и разбавления облака оказывает константа входа α , что неоднократно наблюдалось с помощью теневой установки на опытах с малыми объемами. В рассматриваемых здесь опытах $\alpha=0,29 \pm 0,03$. Таким образом, при одинаковых κ , α и v_0 облака с разными начальными объемами будут совершать геометрически подобные движения, описываемые одним уравнением (1). При $v_0 > 0$ такие движения можно моделировать по числу Фруда

$$Fr = v_0^2 = \left(\frac{dh}{dt} \right)_{t=0}^2 / gr_0.$$

Если же для двух облаков разных размеров κ и α одинаковы, а v_0 различны, то можно сравнивать только поздние стадии их движений с точностью до медленно уменьшающейся разницы в проходимых путях.

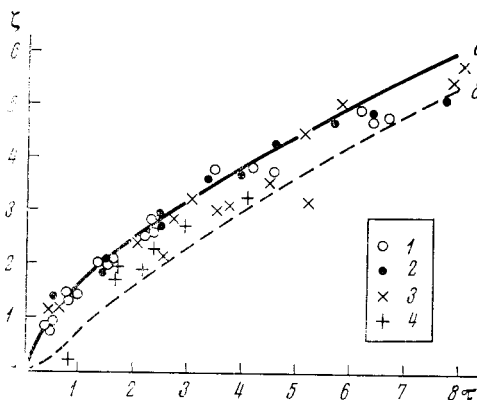


Рис. 1

Рис. 1. Зависимость безразмерного пути, проходимого вершиной облака, от безразмерного времени. Расчетные кривые: $a - \alpha=0,3, v_0=4$; $b - \alpha=0,3, v_0=0$. Высота возмущения лепестков: 1 - $V_0=70$ л; 2 - $V_0=30$ л. Момент поджига облака: 3 - $V_0=20 \div 30$ л; 4 - $V_0=70 \div 90$ л

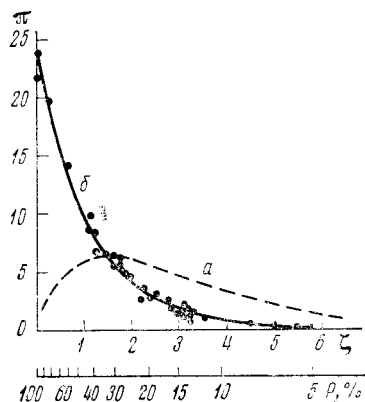


Рис. 2

Рис. 2. Степень расширения облака при сгорании в зависимости от безразмерной высоты вершины поднимающегося облака или среднего процентного содержания водорода. Расчетные кривые: a - полное сгорание гомогенной смеси; b - эмпирическая зависимость, построенная по формуле (3)

С продвижением облака среднее процентное содержание p водорода в нем меняется и способность облака поджечься зависит от пройденного пути, при этом в нашем случае среднее стехиометрическое содержание водорода в нем будет достигаться при $\zeta \approx 1,7$. Поджигание облака на заданной высоте производилось раскаленной спиралькой. С помощью кипосъемки отмечалось время начала поджига облака от момента его старта и объем продуктов сгорания. На той же плоскости ζ, τ отмечены моменты начала горения поднимающихся облаков на разных высотах.

Степень расширения облака

$$\pi = \frac{V_r/V_0}{(\alpha\zeta+1)^3}, \quad (2)$$

где V_r — объем продуктов сгорания, для разных высот ζ поджигающей спиральки представлены опытными точками на рис. 2. На этой же плоскости дана теоретическая зависимость степени расширения облака от высоты (кривая a), которая рассчитана из предположения полного сгорания заранее составленной гомогенной смеси, состоящей из такого же объемного

количества водорода и воздуха, как и наше движущееся облако на высоте ξ , и где температура продуктов сгорания равна температуре пламени в такой смеси. Как видно, движущаяся смесь имеет такую же степень расширения только в районе стехиометрического разбавления. При сгорании облака в начальной стадии его подъема, когда в движущейся смеси есть избыток водорода, получаем большие значения степени расширения, так как избыточный водород сгорает с окружающим облако воздухом. Степень расширения водородного шара, подожженного у его границы сразу после прорыва резиновой оболочки, равна 25 и эта величина уменьшается с продвижением облака. В логарифмических координатах $\lg(25 - V/V_0)$ и $\lg \xi$ экспериментальные точки удовлетворительно располагаются в линейную зависимость, так что степень расширения облака можно описать выражением

$$\pi_1 = (25 - 4,2\xi) / (0,3\xi + 1)^3, \quad (3)$$

представленным на рис. 2 кривой, хорошо описывающей данные эксперимента до $\xi = 5,9$.

Вблизи стехиометрического разбавления поднимающегося облака, содержащего 80 л водорода, скоростная киносъемка показала, что за 0,04 сек. облако сгорает и расширяется в 5,7 раз, а отдельно проведенные опыты с гомогенной стехиометрической смесью дают время сгорания и степень расширения соответственно 0,03 и 6,2 сек. И тогда средняя видимая скорость фронта пламени в горящем облаке 16 м/сек — в полтора раза меньше этой скорости для гомогенной стехиометрической смеси рассматриваемого объема. В области же сильных разбавлений, где $\sigma > 3,45$, степень расширения облака меньше, чем дает нам расчетная кривая при полном сгорании гомогенной смеси такого же состава. При этом максимальная высота ξ , где еще наблюдается горение, равна 5,8, тогда как расчетный бедный предел для усредненной по всему объему облака концентрации наступает при $\xi \approx 4,3$, соответствующей $p = 9\%$ ⁽³⁾, а гомогенная водородно-воздушная смесь при $p < 9\%$ не поджигается. Поэтому факт поджига облака при $\xi > 4,3$ говорит о том, что распределение водорода в нем непостоянно по объему, а больше сосредоточено в одном месте, в некоторой части объема, способной поджечься, которая, как можно видеть из эмпирически полученной формулы (3), уменьшается с высотой. Поэтому доля смеси в рассматриваемом облаке, которую можно поджечь, уменьшается с продвижением и исчезает при $\xi = 5,8$ или при $\sigma = 19$. Такое же поведение степени расширения π при больших разбавлениях наблюдалось и на опытах с малыми начальными объемами.

Институт химической физики
Академии наук СССР
Москва

Поступило
11 II 1975

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ C. P. Wang, Phys. Fluids, v. 16, 744 (1973). ² M. P. Escudier, T. Maxworthy, J. Fluid Mech. v. 61, 541 (1973). ³ I. L. Drell, F. E. Belles, Survey of Hydrogen Combustion Properties. Report NASA, № 1383, 1957. ⁴ В. А. Горев, П. А. Гусев, Я. К. Трошин, ДАН, т. 205, № 4, 875 (1972).