

**ВЛИЯНИЕ УСКОРЕНИЯ ВНЕШНЕЙ СИЛЫ
НА РАЗВИТИЕ ОЧАГА ГОРЕНИЯ В ЗАКРЫТОМ СОСУДЕ**

Г. Г. Копылов, Г. М. Махвиладзе

(Москва)

В последнее время в основном в связи с проблемами техники безопасности интенсивно исследуется поведение локализованных очагов горения в больших ограниченных объемах. Экспериментально установлена определяющая роль естественной конвекции в эволюции очага и предельных явлениях. Поэтому значительный интерес представляет изучение этих процессов при различных величинах ускорения внешней силы. Ниже на основе численного интегрирования системы нестационарных двумерных уравнений движения реагирующего газа, приведенной в [1, 2], исследуется эволюция очага в плоском закрытом сосуде квадратного сечения при различных величинах ускорения, в том числе в условиях невесомости. Для заданного очага зажигания определяются также концентрационные пределы воспламенения (распространения пламени).

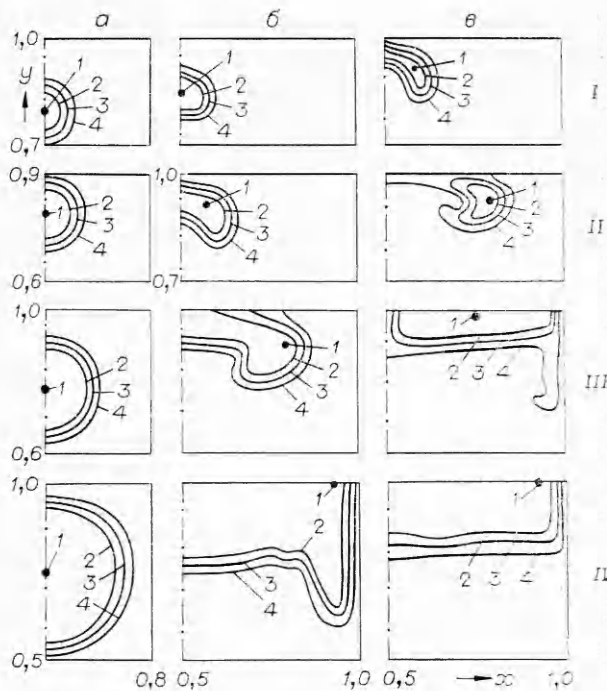
В начальный момент в неподвижном холодном газе (температура $T = T_0$) задается круглый очаг подогрева радиусом r с центром в точке (X_0, Y_0) , заполненный горячими продуктами реакции ($T = T_s > T_0$). На теплоизолированных горизонтальных ($Y = 0, L$) и холодных ($T = T_0$) вертикальных ($X = 0, L$) стенках выполняются условия «прилипания» и непротекания реагента. При введении безразмерных координат x и y , времени τ , скорости, температуры θ , плотности, давления p и концентрации α используются следующие масштабы: $L, \sqrt{L/g_0}$ (g_0 — нормальное ускорение силы тяжести), $\sqrt{Lg_0}, T_0, \rho_0$ — начальная плотность газа при $Y = 0, \rho_0 RT_0/\mu$ (R — газовая постоянная, μ — молекулярный вес смеси), α_0 — начальная концентрация реагента, находящегося в недостатке. Задача содержит следующие безразмерные параметры: число Маха $M^2 = \mu L g_0 / \gamma R T_0$ (в расчетах принималось $M^2 = 0,05$), показатель адиабаты $\gamma = c_p / c_v = 1,4$, относительное ускорение $G = g/g_0 = 0 \div 10$, числа Рейнольдса $Re = r \sqrt{r g_0} / \nu = 40,25$, Прандтля $Pr = \nu / \kappa = 1$ и Шмидта $Sc = -\nu / D_\alpha = 1, q = Q \alpha_0 / c_0 T_0 = 2 \div 5,4, \beta = R T_0 / E = 1/32$, число Дамкеллера $Da = \sqrt{L/g_0} k_0 \exp(-E/R_0 T_s) = 0 \div 300, \varepsilon = r/L = 0,05, \Theta_s = T_s/T_0 = 6,33, x_0 = X_0/L = 0,5, y_0 = Y_0/L = 0,2, 0,8$ и $0,9$. Здесь g — ускорение внешней силы, ν, κ и D_α — кинематическая вязкость, температуропроводность, коэффициент диффузии реагента, Q, E и k_0 — тепловой эффект, энергия активации и предэкспоненциальный множитель. Используемая постановка задачи, основанная на простейшей схеме химического превращения с одним реагирующим компонентом, подробно описана в [1, 2].

В рассматриваемой системе возможны два режима протекания химической реакции: воспламенение, завершающееся полным выгоранием вещества во фронте пламени, или затухание очага. Особенности развития очага в одной и той же воспламеняющейся смеси в условиях невесомости (а), обычной земной гравитации (б) и при пятикратной перегрузке (в) иллюстрируются на рис. 1 ($Da = 200, q = 5,33, y_0 = 0,8$).

В условиях невесомости очаг долгое время сохраняет круговую форму, распространяясь с одинаковой скоростью во всех направлениях от

Рис. 1. Развитие очага горения при различных ускорениях внешней силы.

$I - \tau = 0,44$; а) 1—5,47, 2—4,95, 3—3,37, 4—1,79, б) 1—5,69, 2—4,91, 3—3,34, 4—1,78, в) 1—5,18, 2—4,48, 3—3,09, 4—1,70; $II - \tau = 0,89$: а) 1—5,38, 2—4,65, 3—3,19, 4—1,73, б) 1—5,22, 2—4,52, 3—3,11, 4—1,70, в) 1—5,05, 2—4,32, 3—3,03, 4—1,68; $III - \tau = 1,78$: а) 1—5,19, 2—4,49, 3—3,09, 4—1,70, б) 1—5,19, 2—4,49, 3—3,09, 4—1,70, в) 1—5,03, 2—4,35, 3—3,01, 4—1,67; $IV - \tau = 3,57$: а) 1—5,19, 2—4,49, 3—3,10, 4—1,70, б) 1—5,33, 2—4,61, 3—3,16, 4—1,72, в) 1—5,23, 2—4,52, 3—3,11, 4—1,70. *



центра. Зона химического превращения сосредоточена в узком слое на поверхности очага, заполненного продуктами реакции. При $G = 0$ естественная конвекция отсутствует. Если очаг внесен в газ, длительное время находящийся в состоянии невесомости (начальное условие $p(\tau = 0) = 1$, которое может реализоваться в долговременном космическом эксперименте [3]; на рис. 1 представлен этот случай), газ движется радиально от центра очага вследствие теплового расширения. При иницировании горения в момент возникновения невесомости (начальное условие $p(\tau = 0) = \exp(-\gamma M^2 y)$, реализуемое при полетах самолетов по кеплеровским горкам [4]) на это движение накладываются акустические колебания давления и скорости газа с частотой порядка $1/M$, которые возникают под влиянием начального перепада давления $\Delta p \sim \gamma M^2$, уравновешивавшего вертикальный столб газа. Из-за распространения звуковых возмущений максимальная по объему скорость газа увеличивается (примерно в 3 раза) по сравнению со случаем однородного начального поля давления. Таким образом, в невесомости возникают движения реагирующей среды, но со скоростями, существенно меньшими характерной скорости конвекции при $G = 1$.

В поле массовой силы вследствие возникновения конвекции наблюдается трехстадийная схема воспламенения: подъем очага, его растекание вдоль верхней теплоизолированной границы и формирование фронта пламени, распространяющегося вниз (см. рис. 1, начальное условие $p(\tau = 0) = \exp(-\gamma M^2 G y)$). Чем больше ускорение G , тем быстрее происходит «всплывание» очага (см. рис. 1, I). Растекающийся очаг при большем G сильнее «прижат» к верхней стенке из-за увеличения интенсивности восходящего конвективного потока (ср. рис. 1, II и III). Формирование фронта пламени при $G = 1$ и 5 завершается примерно в одно время. Поскольку при растекании в поле меньшей массовой силы возникает горячая область большего размера и большей температуры, фронт пламени при своем движении вниз в случае $G = 1$ опережает зону химического превращения при $G = 5$ (см. рис. 1, IV). В невоспламеняющихся околопредельных смесях растекание очага сопровождается резким его охлаждением вследствие конвективного перемешивания с холодным газом.

В расчетах определялись концентрационные пределы воспламенения — критические условия, достигаемые при изменении состава горючей смеси, которому отвечает изменение параметра q (или концентрации α_0)

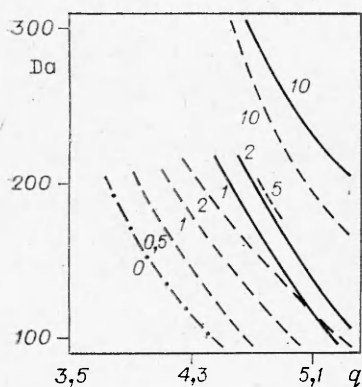


Рис. 2. Влияние ускорения и местоположения источника зажигания на концентрационные пределы воспламенения.

при фиксированных остальных параметрах. На рис. 2 в плоскости (Da, q) представлены предельные кривые (около них проставлены значения G), справа от которых расположены области воспламенения. Сплошные кривые отвечают зажиганию снизу ($y_0 = 0,2$), штриховые — зажиганию сверху ($y_0 = 0,9$). В случае $G = 0$ концентрационные пределы при обоих указанных типах начального условия для давления практически совпадают (звуковые возмущения не оказывают существенного воздействия на тепловую и концентрационную структуру очага).

При увеличении ускорения концентрационный предел воспламенения достигается при меньшем разбавлении горючей смеси, что объясняется интенсификацией конвективного теплообмена, вызывающей охлаждение всплывающего очага и последующее затухание реакции при его растекании.

Данные рис. 2 позволяют также судить о влиянии местоположения источника зажигания на концентрационные пределы. В условиях невесомости положение предельной кривой не зависит от начальной высоты очага. В поле силы тяжести при фиксированном G из-за возникновения конвекции пределы при зажигании сверху и снизу не совпадают. Вследствие большей интенсивности конвективного движения, формирующегося при зажигании снизу, нижний очаг при приближении к верхней стенке охлаждается сильнее, чем верхний. Поэтому в случае теплоизолированной верхней стенки воспламенению одной и той же смеси способствует зажигание сверху. При увеличении G предельные кривые, полученные при зажигании снизу и сверху, сближаются, поскольку уменьшается различие между временами подъема верхнего и нижнего очага.

Полученные результаты свидетельствуют о сложной газодинамике процесса распространения очага горения в реакционноспособном газе. Конвективное движение реагирующей смеси вызывает значительное изменение внутренней структуры и формы очага, приводит к сужению пределов воспламенения по мере увеличения ускорения по сравнению с нормальным ускорением силы тяжести. В условиях невесомости концентрационные пределы расширяются. Перечисленные факты находятся в качественном согласии с имеющимися экспериментальными данными.

ЛИТЕРАТУРА

1. Г. М. Махвиладзе, И. П. Николова. Развитие очага горения в реагирующем газе в условиях естественной конвекции. Препринт ИПМ АН СССР, № 189, 1981.
2. Г. М. Махвиладзе, И. П. Николова. ФГВ, 1982, 18, 5, 39.
3. A. Berlad. Progress in Astronaut. and Aeronaut., 1981, 73, 12.
4. В. Н. Кривулин, Е. А. Кудрявцев, А. Н. Баратов и др. Докл. АН СССР, 1979, 247, 5, 1184.