

# ВЛИЯНИЕ ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА ВЕРХНЕЙ ГРАНИЦЫ НА ЭВОЛЮЦИЮ ОЧАГА ГОРЕНИЯ И КОНВЕКТИВНЫЕ ПРЕДЕЛЫ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ В ЗАКРЫТОМ СОСУДЕ

Г. Г. Копылов, Г. М. Махвиладзе

(Москва)

При очаговом воспламенении газовой горючей смеси в закрытом сосуде, реализующемся по трехстадийной схеме [1], существенную роль играет тепловой режим верхней стенки сосуда. В работах [2—5] этот процесс исследовался численно в плоской постановке для случая теплоизолированной верхней границы. Ниже рассматривается эволюция заданного очага в условиях, когда верхняя стенка закрытого плоского сосуда квадратного сечения поддерживается при начальной (комнатной) температуре. Проводится сравнение особенностей очагового воспламенения и поведения предельных кривых в сосудах с адиабатической и холодной верхней границей при нормальном ускорении силы тяжести, в невесомости и при перегрузках.

Физическая и математическая постановка задачи, выбор характерных масштабов, определяющие параметры и их значения, начальные и граничные условия даны ранее в [4], там же описана численная методика. В настоящей работе температурные условия на верхней границе задаются или в виде

$$y = 1: \frac{\partial \Theta}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

(адиабатически изолированная граница) или

$$y = 1: \Theta = 1 \quad (2)$$

(холодная граница). Здесь  $y$  — вертикальная координата;  $\Theta$  — безразмерная температура, отнесенная к начальной температуре холодного газа  $T_0$ . В дальнейшем используются следующие параметры: число Дамкеллера  $Da = \sqrt{L/g_0} k_0 \exp(-E/R_0 T_0)$ ; безразмерный тепловой эффект реакции  $q = Q\alpha_0/c_0 T_0$ ; относительная величина внешней силы  $G = g/g_0$  и начальная вертикальная координата очага  $y_0$ , где  $L$  — длина стороны области;  $g_0$  — нормальное ускорение силы тяжести;  $g$  — ускорение внешней силы;  $c_0$  и  $R_0$  — теплоемкость смеси и газовая постоянная;  $k_0$ ,  $E$  и  $Q$  — предэкспоненциальный множитель, энергия активации и тепловой эффект химической реакции;  $\alpha_0$  — начальная концентрация реагента;  $T_0$  — начальная температура очага.

Наряду с исследованием особенностей эволюции очага целью расчетов являлось определение граничных кривых, отделяющих на плоскости параметров  $Da$ ,  $q$  область воспламенения от области затухания реакции. Смесь считалась воспламенившейся, если эволюция системы завершилась полным выгоранием реагента во фронте пламени (в расчетах достаточно было зафиксировать формирование устойчивого фронта пламени, распространяющегося сверху вниз).

Расчеты для граничного условия (1), проведенные в [4, 5], подтвердили существование трехстадийной схемы воспламенения при нижнем зажигании (полагалось  $y_0 = 0,2$ ), включающей подъем очага, его растекание вдоль верхней границы и последующее распространение фронта пламени вниз. При верхнем зажигании ( $y_0 = 0,9$ ) первая стадия не выражена. Показано, что при подъеме очага в сосуде возникают области с разной интенсивностью протекания химической реакции. Формирование этих областей обусловлено возникновением вихревой структуры течения газа (образуется пара вихрей, газ поднимается в центре сосуда). На стадии подъема наиболее интенсивная реакция развивается в плоскости симметрии сосуда; на периферии очага вблизи ядер вихрей газ также

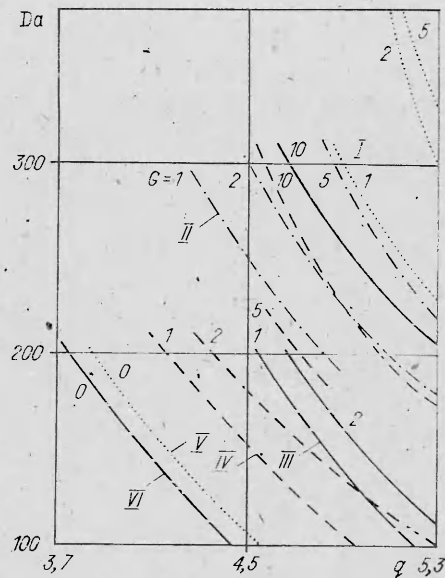


Рис. 1. Пределы воспламенения смеси в зависимости от величин  $G$  и  $y_0$  при различных тепловых режимах верхней границы сосуда. Около кривых проставлена величина  $G$ .

Граничное условие (1): сплошные линии — нижнее зажигание, штриховые — верхнее; граничное условие (2): штрихпунктир — нижнее зажигание, пунктир — верхнее.

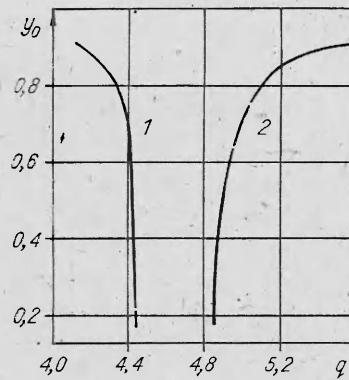


Рис. 2. Зависимость предела воспламенения от начального положения очага при  $Da = 200$ ,  $G = 1$ .

1 — граничное условие (1); 2 — граничное условие (2).

имеет повышенную температуру, а поле скорости химической реакции — локальный максимум. По достижении адиабатически изолированной верхней стенки центральная зона реакции начинает распространяться к обеим боковым границам. Именно эволюция центральной нагретой зоны, формирующейся при подъеме, играет решающую роль в образовании фронта пламени; реакция в других областях несущественна. При верхнем зажигании области с различной скоростью реакции сформироваться не успевают.

При нижнем зажигании конвективный теплообмен горячего очага с окружающим холодным газом интенсивнее, чем при верхнем [4]. Поэтому воспламенению смеси способствует зажигание в верхней части сосуда (ср. кривые IV, III на рис. 1; здесь и ниже область воспламенения расположена справа от кривых). На рис. 2, 1 представлена зависимость предела воспламенения от начальной высоты очага при фиксированном  $Da = 200$ . Она показывает, что при приближении точки зажигания к верхней границе предел расширяется в результате снижения конвективных теплотерь из очага.

При переходе к граничному условию (2) (холодная верхняя граница) поведение очага вдали от стенки не меняется. Отличия возникают, когда горячее облако приближается к верхней границе и начинается процесс конвективного теплообмена между очагом и холодной стенкой. На рис. 3 представлены средние безразмерные тепловые потоки через

верхнюю границу (числа Нуссельта  $Nu = LT_0 / (T_s - T_0) \int_0^1 \frac{\partial \theta}{\partial y} \Big|_{y=1} dx$ )

как функции времени. Резкое возрастание  $Nu$  происходит при верхнем зажигании после развития конвекции (кривая 1), при нижнем — после приближения очага к верхней границе (кривая 2).

В результате охлаждения у верхней границы образуется тонкий слой холодных продуктов сгорания, из-за температурной инверсии положение которого неустойчиво. Устойчивость теряется вблизи плоскости симметрии сосуда, где формируется холодный слой. Холодный газ опускается в центре сосуда, образуя вторую пару вихрей с противоположным вращением (рис. 4). Эти вихри локализованы внутри области продуктов сгорания (за фронтом пламени  $\alpha = 0$ ); проникновению холодного газа вниз

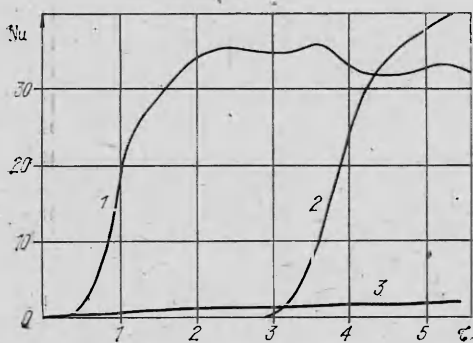


Рис. 3. Временные зависимости среднего теплового потока через верхнюю границу сосуда (граничное условие (2)).

1 — верхнее зажигание,  $G=1$ ,  $Da=270$ ,  $q=5,33$ ,  $\tau \sim 0,8$ ; 2 — нижнее зажигание,  $G=1$ ,  $Da=200$ ,  $q=4,9$ ,  $\tau \sim 3,8$ ; 3 — верхнее зажигание при  $G=0$ ,  $Da=200$ ,  $q=3,9$ .

препятствует восходящий поток расширяющихся в зоне реакции газов. В результате перемешивания охлажденных продуктов с горячими, средняя температура за фронтом падает, реакция замедляется. По этой причине пределы воспламенения в сосуде с холодной границей существенно сужаются по сравнению с адиабатическим случаем (воспламенение смеси затрудняется).

Из-за уменьшения скорости химического превращения в центральной горячей области основную роль начинает играть реакция в ядрах вихрей, поскольку локализованные в них горячие продукты реакции не испытывают непосредственного контакта с холодной границей и могут воспламенить несгоревшую смесь (на рис. 4 эта область заштрихована). Можно сделать вывод, что в сосуде с холодной границей воспламеняющаяся смесь должна обладать такой высокой реакционной способностью (и соответственно большими, чем в адиабатическом случае, значениями  $Da$  и  $q$ ), чтобы на стадии подъема реакция вблизи ядер вихрей протекала достаточно интенсивно.

Итак, наиболее существенное различие в эволюции очага при смене теплового режима верхней стенки сосуда заключается в следующем: воспламенение горючей смеси, приводящее к полному выгоранию реагента, осуществляется в различных областях интенсивной химической реакции, формирующихся при подъеме очага.

Поскольку при верхнем зажигании реакция локализована вблизи верхней холодной границы, инициирование реакции в смеси, воспламеняющейся при нижнем зажигании, может не произойти (ср. кривые I и II на рис. 1) — ситуация, обратная той, которая наблюдается в случае адиабатической верхней границы (кривые IV и III на рис. 1). Из рис. 2, 1, 2 видно, что сравнительно близкие при нижнем зажигании пределы воспламенения значительно (в 1,5 раза) отличаются при верхнем.

Интересно отметить также следующее обстоятельство. В случае адиабатически изолированной верхней границы возникновение естественной конвекции приводит к затруднению воспламенения, она способствует охлаждению очага. В случае холодной границы конвекция способствует воспламенению, поскольку главенствующую роль начинает играть реакция в ядрах вихрей — горячих зонах, возникающих именно благодаря развитию конвекции. Действительно, для смеси на границе воспламенения средние температуры в центральной зоне и в зоне ядер вихрей составляют: при граничном условии (1) ( $Da=200$ ,  $q=4,5$ )  $\Theta=5,5$  и 1,6, при условии (2) ( $Da=300$ ,  $q=4,4$ )  $\Theta=5,0$  и 5,5 соответственно.

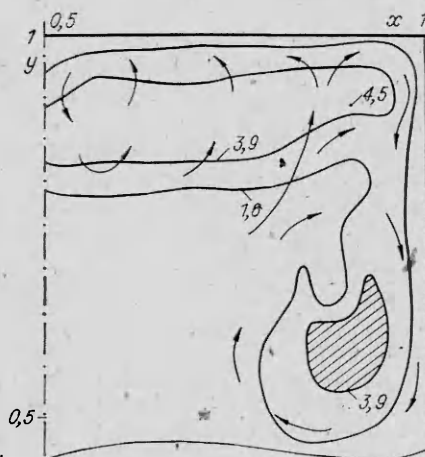


Рис. 4. Одновременное протекание реакции у верхней холодной границы и в ядрах вихрей при нижнем зажигании.  $G=1$ ,  $Da=200$ ,  $q=4,4$ ,  $y_0=0,5$ ,  $\tau=4,3$ ; стрелками показано направление течения газа; около изотерм проставлены значения температур (в силу симметрии задачи изображена половина области).

Проследим влияние ускорения, создаваемого внешней массовой силой. В условиях невесомости полностью исключается влияние естественной конвекции на эволюцию очага, очаг расширяется равномерно во все стороны и сохраняет первоначальную круговую форму. Движение среды в этом случае обусловлено неоднородностями давления по объему, возникающими благодаря протекающей реакции, и имеет малую интенсивность. Максимальная по объему скорость газа в 4—5 раз меньше, чем при  $G=1$ . Поэтому предел воспламенения смеси значительно расширен по сравнению с пределами в условиях земной гравитации (см. рис. 4, VI) и практически не зависит от начального положения очага.

Холодная верхняя граница при  $G=0$  может оказать воздействие на начальную стадию эволюции очага, если он возникает вблизи этой границы. Естественно, в этом случае смесь воспламеняется труднее, чем при нижнем зажигании (см. рис. 1, V, VI; кривая VI отвечает двум совпадающим пределам: адиабатическому при  $G=0$  и нижнему неадиабатическому). Следует отметить, что различие между соответствующими предельными кривыми существенно меньше (примерно в 4 раза), чем при  $G=1$ . Это объясняется тем, что в последнем случае основную роль в охлаждении очага у верхней границы играет не кондуктивный, а конвективный теплоперенос (см. также кривые 2 и 3 на рис. 3: число  $Nu$  при  $G=0$  примерно в 20 раз меньше, чем при  $G=1$ ). Таким образом, рассмотрение эволюции очага в условиях невесомости подтверждает представление о конвективной природе очагового воспламенения в сосудах больших объемов.

При увеличении перегрузки (расчеты проводили для  $G=2, 5$  и 10) общая картина процесса воспламенения не меняется по сравнению со случаем  $G=1$ . С ростом  $G$  увеличивается характерная скорость конвекции ( $\sim \sqrt{G}$ ), скорость подъема очага и интенсивность конвективного теплообмена. Закономерности эволюции очага при различных  $G$  для адиабатически изолированной стенки описаны в [5].

В случае холодной верхней стенки с ростом  $G$  неустойчивость слоя холодных продуктов реакции у верхней границы развивается быстрее. Число вихрей между этой границей и горизонтальным фронтом пламени возрастает от двух при  $G=1$  (рис. 5, а) до четырех при  $G=5$  (рис. 5, в). Это согласуется с известным результатом теории конвекции: при увеличении числа Рэлея  $Ra$  ( $Ra \sim G$ ) граница неустойчивости смещается в сторону больших значений волнового числа  $k$  (см. [6]). Соответственно возрастает и число нисходящих потоков охлажденных продуктов (один, два или три холодных термика). При увеличении перегрузки эти потоки способны сильно деформировать («прорвать») фронт пламени и вызвать затухание реакции (см. рис. 5, б).

Следовательно, с увеличением перегрузки, интенсифицирующей ох-

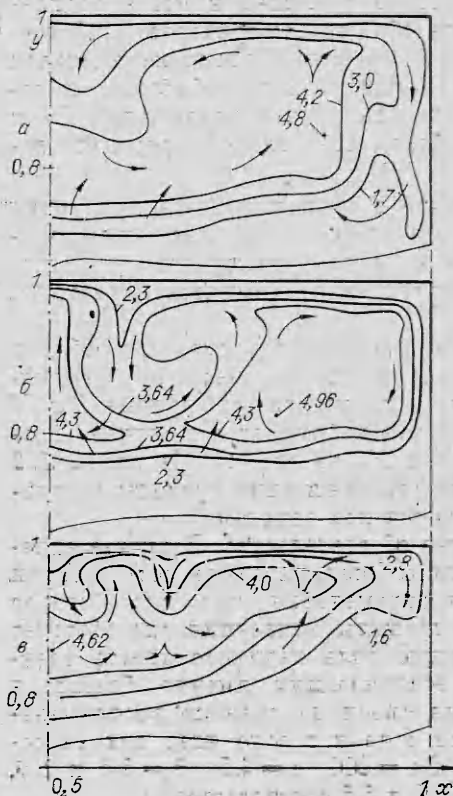


Рис. 5. Протекание реакции вблизи верхней холодной границы при различных  $G$  (верхнее зажигание).

а)  $G=1$ , ( $Da=300$ ,  $q=5,0$ ,  $\tau=4,3$ ); б)  $G=2$  ( $Da=270$ ,  $q=5,2$ ,  $\tau=4,3$ ); в)  $G=5$  ( $Da=300$ ,  $q=4,8$ ,  $\tau=2,7$ ). Обозначения аналогичны рис. 4.

лаждение очага, смесь воспламеняется труднее (пределы сужаются). Относительное положение верхнего и нижнего пределов на плоскости ( $Da$ ,  $q$ ) не изменяется по сравнению со случаем  $G = 1$  (см. рис. 1). В случае теплоизолированной границы с ростом  $G$  верхний и нижний пределы сближаются. Это объясняется тем, что значительно сокращается стадия подъема очага и основное охлаждение происходит в результате конвективного перемешивания, сопровождающего растекание горячих газов вдоль верхней границы. Когда верхняя стенка поддерживается холодной, такого сближения пределов не наблюдается (см. рис. 1). Это объясняется так же, как и выше, тем, что для холодной границы воспламенение смеси происходит прежде всего благодаря интенсивному протеканию реакции в областях вблизи ядер вихрей. Поскольку, далее, эти области возникают только в процессе развития конвекции на стадии подъема очага, нижнее зажигание значительно облегчает воспламенение смеси; предел нижнего воспламенения сдвигается к меньшим значениям  $Da$  и  $q$ .

Полученные результаты свидетельствуют о сложной газодинамике локализованного очага подогрева, развивающегося в реакционноспособном газе. В случае холодной верхней границы основным механизмом, обуславливающим потухание смеси, является развивающаяся вблизи нее конвекция. Показано, что иницирование фронта пламени происходит для разных граничных условий в различных областях интенсивного протекания реакции, формирующихся на стадии подъема очага. Что касается пределов воспламенения, то их относительное расположение при верхнем и нижнем зажигании меняется по сравнению со случаем адиабатически изолированной верхней стенки на противоположное. Интенсификация конвекции, обусловленная перегрузками, приводит к затруднению воспламенения; напротив, невесомость способствует воспламенению, и пределы расширяются.

Поступила в редакцию 31/X 1983

#### ЛИТЕРАТУРА

1. L. A. Lovachev, V. S. Babkin e. a. Combust. Flame, 1973, 20, 2.
2. Г. М. Махвиладзе. Химическая физика, 1983, 2, 2.
3. Г. М. Махвиладзе, И. П. Николова. ФГВ, 1982, 18, 5.
4. Г. Г. Копылов, Г. М. Махвиладзе. ФГВ, 1983, 19, 2.
5. Г. Г. Копылов, Г. М. Махвиладзе. ФГВ, 1983, 19, 4.
6. Г. З. Гершуни, Е. М. Жуховицкий. Конвективная устойчивость несжимаемой жидкости. М.: Наука, 1972.

### О СКАЧКЕ ДАВЛЕНИЯ ПРИ ДОГОРАНИИ ТОНКОЙ ПЛАСТИНЫ В ПОЛУЗАМКНУТОМ ОБЪЕМЕ

В. А. Архипов, П. В. Белоусов, В. Н. Вилюнов

При двустороннем горении тонкой пластины конденсированного вещества по мере сближения горячих поверхностей происходит ее разогрев, приводящий к уменьшению температурного градиента на поверхности и к увеличению скорости горения. Процесс догорания пластины носит, следовательно, нестационарный характер. В [1] методом интегральных соотношений решена задача о горении пластины при постоянном давлении. В настоящей статье рассматривается горение пластины в полузамкнутом объеме в условиях нарастающего давления.