

К АНАЛИЗУ НЕСТАЦИОНАРНОЙ КАРТИНЫ ЗАЖИГАНИЯ КОНДЕНСИРОВАННОГО ВЕЩЕСТВА НАКАЛЕННОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

И. Г. Дик, А. М. Селиховкин
(Томск)

Задача о зажигании конденсированного вещества горячим телом — исходная для теории возбуждения горения. Анализ предпосылок и методов ее решения — ключ для исследования многих других проблем теории.

Для математической постановки запишем уравнение теплопроводности

$$\frac{\partial \Theta}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 \Theta}{\partial \xi^2} + \exp \Theta, \quad \tau \geq 0, \quad \xi \geq 0$$

с начальным $\Theta(0, \xi) = -|\Theta_n| < 0$ и краевым $\Theta(\tau, 0) = 0$, $\Theta(\tau, \infty) = -|\Theta_n|$ условиями. Здесь Θ , τ , ξ — безразмерные температура, время и координата.

Решение [1] для определения времени установления теплового равновесия $\partial \Theta(\tau_0, 0)/\partial \xi = 0$ в случае $|\Theta_n| \gg 1$ основано на предположении квазистационарного протекания химической реакции вблизи накаленной поверхности. Квазистационарность поддерживается отводом тепла из реакционной зоны в глубь вещества в течение всего периода τ_0 . Асимптотический характер решения подтвержден в [2] в ходе анализа задачи методом сращиваемых асимптотических разложений.

Оценка, данная в [1]:

$$\tau_0 = \Theta_n^2 / (2\pi), \quad (1)$$

плохо согласуется с численными расчетами при умеренных $|\Theta_n|$, что потребовало подбора эмпирических формул. Например, в [3] после численных расчетов на ЭВМ предложена зависимость

$$\tau_0 = 0,174\Theta_n^2 + 0,83|\Theta_n|. \quad (2)$$

Асимптотические методы дали в дополнение к аналитической формуле (1) для верхней оценки члены $\sim |\Theta_n|^{3/2}$, для нижней — $\sim |\Theta_n|^{4/3}$, что не согласуется с (2).

В [4] предложена оригинальная нестационарная картина явления, существенным образом опирающаяся на представления о стационарной волне горения (СВГ). Предполагается, что к моменту $\Theta_n^2/2\pi$ образуется зона химической реакции, способная к распространению в глубь вещества со скоростью $\omega = \sqrt{2}/|\Theta_n|$ [4]. Граница зоны реакции со скоростью ω движется до тех пор, пока ее толщина ξ_p не сравняется с толщиной зоны химической реакции СВГ (в [4] $\xi_p = \sqrt{2}$). Этот момент считается временем наступления теплового равновесия, которое определяется из выражения

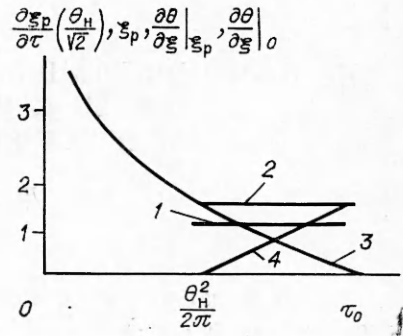
$$\tau_0 = \frac{\Theta_n^2}{2\pi} + \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{2}/|\Theta_n|} = \frac{\Theta_n^2}{2\pi} + |\Theta_n|, \quad (3)$$

что дает двучленную формулу, по виду и по количественным оценкам близкую к (2).

Поведение характеристик процесса, определяющих его развитие в изложенной теоретической схеме [4], проиллюстрировано на рис. 1. Отметим, что раньше при анализе задачи на ЭВМ динамика указанных характеристик не изучалась.

Рис. 1. Динамика различных характеристик в процессе зажигания по теоретической схеме [4].

1 — скорость движения координаты зоны химической реакции $\frac{\partial \xi_p}{\partial \tau} \left(\frac{|\Theta_n|}{\sqrt{2}} \right)$; 2 — тепловой поток из зоны реакции (по абсолютной величине) $\frac{\partial \theta}{\partial \xi}(\tau, \xi_p)$; 3 — градиент температуры на поверхности (по абсолютной величине) $\frac{\partial \theta}{\partial \tau}(\tau, 0)$; 4 — координата зоны реакции ξ_p .



Имеет смысл вернуться к сформулированной задаче и, используя численные методы, проанализировать динамику процесса, проверив при этом достоверность основных посылок в [4].

Применялась неявная четырехточечная схема, дающая аппроксимацию $(\Delta \tau + \Delta \xi^2)$. Проведено исследование схемы на сходимость, а также сверены результаты по расчету τ_0 с ранее полученными [3]. Координата границы зоны химической реакции ξ_p определялась как точка перегиба по ξ на кривой $\Theta(\xi, \tau)$, для чего на каждом временном слое по табличной функции $\Theta(\xi)$ строился полином третьей степени (с использованием пяти рядом стоящих значений, сглаженных по методу наименьших квадратов). Для построения скорости движения зоны химической реакции численно дифференцировали функцию $\xi_p(\tau)$.

На рис. 2, а показана динамика использованных в [4] характеристик процесса зажигания при $|\Theta_n| = 5$. Отметим, что зона химической реакции существует с момента $\tau = 0$ и расширяется в дальнейшем почти равномерно. Необходимость существования такой зоны диктуется исходным уравнением и граничным условием при $\xi = 0$, в соответствии с которым кривая в любой момент времени выпуклая и, чтобы выполнялось условие при $\xi \rightarrow \infty$, должна иметь перегиб.

Скорость продвижения зоны реакции слабо уменьшается со временем почти по линейному закону (см. рис. 2, а). Температура на границе зоны реакции устанавливается к моменту $\Theta_n^2/2\pi$ и в дальнейшем практически постоянна и примерно равна $-1,45$ (5).

Тепловой поток (см. рис. 2, а, 3) (по абсолютной величине) из зоны реакции при $\tau = \Theta_n^2/2\pi$ действительно близок к теоретическому значению $\sqrt{2}$. Однако расхождение между потоками от зажигающей пластины (см. рис. 2, а, 4) и из зоны реакции к этому моменту достаточно

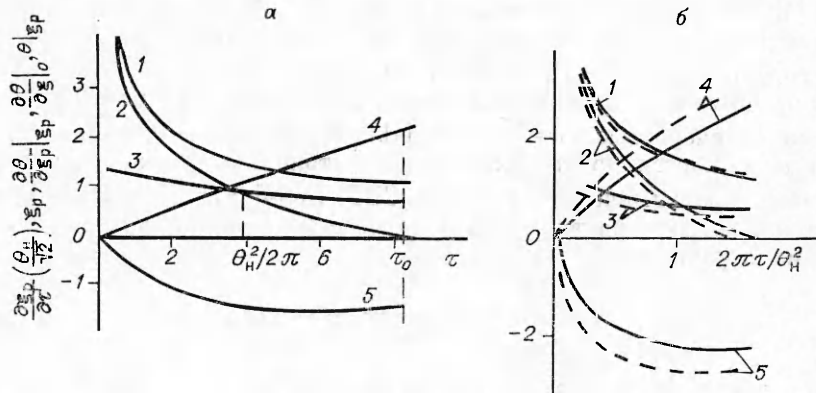


Рис. 2. Динамика характеристик (расчет на ЭВМ).

а) $|\Theta_n| = 5$; б) — $|\Theta_n| = 10$, --- $|\Theta_n| = 15$. 1 — $\frac{\partial \theta}{\partial \xi}(\tau, \xi_p)$; 2 — $\frac{\partial \theta}{\partial \xi}(\tau, 0)$; 3 — $\frac{\partial \xi_p}{\partial \tau} \times \left(\frac{|\Theta_n|}{\sqrt{2}} \right)$; 4 — $\xi_p(\tau)$; 5 — $\Theta(\tau, \xi_p)$.

большое. В отличие от гипотезы [4], поток из зоны реакции меняется весь период индукции.

Величина $\Delta\xi_p$ — разница между толщинами зоны реакции в момент установления теплового равновесия на границе и моментом $\Theta_H^2/2\pi$ не равна $\sqrt{2}$, как в [4]. Частично это может быть связано с условностью определения толщины зоны реакции. Кроме того, $\Delta\xi_p$ убывает с ростом $|\Theta_H|$, например при $|\Theta_H| = 5, 10, 15$ $\Delta\xi_p = 1,0; 0,8$ и $0,68$ соответственно (см. рис. 2). При других значениях $|\Theta_H|$ картина процесса остается прежней. Наиболее хорошо сохраняются свойства достижения теплового потока из зоны реакции, значения $\sqrt{2}$ в момент $\Theta_H^2/2\pi$.

Сравнение рис. 1 и 2 дает основание сделать вывод, что в [4] качественно верно дана трактовка процесса зажигания как образования зоны СВГ. Формула для расчета τ_0 может быть представлена в виде

$$\int_{\Theta_H^2/2\pi}^{\tau_0} \left(\frac{d\xi_p}{d\tau} \right) d\tau = \Delta\xi_p.$$

Выбирая некоторое среднее $\langle d\xi_p/d\tau \rangle$, получим

$$\tau_0 = \frac{\Theta_H^2}{2\pi} + \frac{\Delta\xi_p}{\langle d\xi_p/d\tau \rangle}. \quad (4)$$

В [4] $\Delta\xi_p = \sqrt{2}$ завышено по сравнению с расчетом на ЭВМ; $d\xi_p/d\tau = \sqrt{2}/|\Theta_H| = \text{const}$ и тоже завышено по сравнению с численными результатами. В совокупности две неточности компенсируются, давая неплохое совпадение по τ_0 . Рис. 2, б свидетельствует, что расчет $\Delta\xi_p/\langle d\xi_p/d\tau \rangle$ по [4] — не асимптотический, поскольку с ростом $|\Theta_H|$ скорость движения зоны $d\xi_p/d\tau$ все больше отличается от теоретического значения $\sqrt{2}/|\Theta_H|$. Аналогичное замечание справедливо для величины $\Delta\xi_p$, характера образования реакционной зоны и других характеристик. Но поскольку с ростом $|\Theta_H|$ доля второго слагаемого в (3) уменьшается, в целом формула хорошо аппроксимирует расчетную зависимость $\tau_0(\Theta_H)$.

Авторы благодарят В. Н. Вилюнова и Е. А. Некрасова за плодотворное обсуждение работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Зельдович Я. Б. Докл. АН СССР, 1963, 150, 2, 283.
2. Буркина Р. С., Вилюнов В. Н. ПМТФ, 1976, 6, 96.
3. Вилюнов В. Н. Теория зажигания конденсированных веществ.— Н.: Наука, 1984.
4. Сепляревский Б. С. // Химическая физика процессов горения и взрыва. Горение конденсированных систем.— Черногловка: ОИХФ АН СССР, 1986.

Поступила в редакцию 9/XI 1987,
после доработки — 10/III 1988

УДК 621.436 : 536

ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ РАСПЫЛЕННОГО ЖИДКОГО ТОПЛИВА НА ОСОБЕННОСТИ ЕГО СГОРАНИЯ В ЗАМКНУТОМ ОБЪЕМЕ

А. Н. Бажайкин
(Новосибирск)

Отдельные стадии дизельного процесса имитируются и изучаются в установках постоянного объема, куда подается сжатый, нагретый воздух и впрыскивается форсункой под большим давлением моторное топливо. Горение образовавшейся при впрыске топливной струи определя-