

УДК 69:614.8

КРИТИКА “ТЕОРИИ ЗАЖИГАНИЯ НАКАЛЕННОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ” Я.Б. ЗЕЛЬДОВИЧА. САМОВОСПЛАМЕНЕНИЕ БЕСКОНЕЧНОГО ГОРЮЧЕГО НАКАЛЕННЫМИ ТЕЛАМИ

© 2023 г. А. А. Филиппов^{1,*}

Представлено академиком РАН А.А. Берлиным 27.05.2022 г.

Поступило 27.05.2022 г.

После доработки 07.06.2022 г.

Принято к публикации 10.02.2023 г.

Основные принципы теплового взрыва были изучены и опубликованы к 1980 г. Казалось, что исследования завершены, но позднее было обнаружено, что условие “зажигания” Я.Б. Зельдовича не коррелирует с данными эксперимента. “Теория зажигания накаленной поверхностью” лежит в основе теории зажигания, и хотя вычисления проведены верно, полученные результаты ошибочно отнесены к зажиганию, но в реальности они описывают самовоспламенение бесконечного горючего. В нашей работе показано, что тепловой взрыв горючего от накаленного тела может развиваться как зажигание и как самовоспламенение. Даны условия самовоспламенения бесконечного горючего плоской поверхностью и цилиндром, а также вероятное условие зажигания горючего между параллельными стенками разной температуры.

Ключевые слова: тепловой взрыв, теория и критические условия самовоспламенения и зажигания

DOI: 10.31857/S2686740023050048, **EDN:** OVYRS

В теории теплового взрыва рассматривают самовоспламенение горючего в замкнутом объеме и его зажигание от внешнего накаленного источника тепла. Впервые самовоспламенение изучал Н.Н. Семенов [1] и Д.А. Франк-Каменецкий [2], а зажигание — Я.Б. Зельдович [3]. Теория теплового взрыва была изложена в книгах [4, 5], и, казалось, что фундаментальные исследования завершены к 1980 г. Но в 1984 г. А.А. Филиппов обнаружил [6], что при зажигании горючего газа накаленными цилиндрами данные эксперимента [11] не коррелируют с условием зажигания (8), обнаруженным в работе [3], но ложатся на одну прямую, используя условие (20), полученное в работах [6–9]. В работе [9], решая стационарное уравнение теплопроводности при малых потоках тепла от накаленной поверхности, было получено условие (8), которое по ряду косвенных признаков было отнесено к самовоспламенению бесконечного горючего, но точное доказательство представлено в этой работе.

Рассмотрим тепловой взрыв бесконечного горючего от горячего плоского полупространства,

цилиндра и сферы, при различных граничных условиях у накаленной поверхности и вдали от нее, при отсутствии конвекции и выгорания.

1. ПЛОСКАЯ СИММЕТРИЯ

Стационарное уравнение теплопроводности, при наличии теплового потока (q) у поверхности стенки, имеет вид [2–10]:

$$\lambda \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} = -Qk \exp(-E/RT), \quad (1)$$

$$T|_{r=0} = T_s, \quad \frac{\partial T}{\partial r} = q, \quad (2)$$

где Q , k , E — теплота, предэкспоненциальный множитель и энергия активации химической реакции, r — расстояние от поверхности, λ — теплопроводность горючего.

Сделаем замену переменных [4–10]:

$$\theta = (T - T_s)E/RT_s^2, \quad \xi = r/\ell, \quad (3)$$

где

$$\ell = \left[\exp\left(\frac{E}{RT_s}\right) \cdot 2\lambda RT_s^2 / kQE \right]^{1/2}$$

есть характерный размер.

¹Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н.Н. Семенова Российской академии наук, Москва, Россия

*E-mail: 7987961@mail.ru

В безразмерном виде система уравнений (1), (2) примет вид

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial \xi^2} = -2 \exp \theta, \quad (4)$$

$$\theta|_{\xi=\xi_s} = 0, \quad -\frac{\partial \theta}{\partial \xi}|_{\xi_s} = M. \quad (5)$$

Решая систему уравнений (4), (5), согласно [5, 9] получим

$$\frac{\partial \theta}{\partial \xi} = 2 \operatorname{ch} C \operatorname{th}(C - \xi \operatorname{ch} C), \quad (6)$$

где $C = \operatorname{arsh}(M/2)$ – константа интегрирования.

Выражение (6), согласно [9], примет вид

$$-\frac{\partial \theta}{\partial \xi}|_{\xi=\infty} \approx M(1 + 4/M^2)^{0.5}. \quad (7)$$

1.1. Самовоспламенение бесконечного горючего

Из выражения (7) при $M \ll 1$ для градиента температуры у накаленной поверхности и на бесконечном удалении от нее в работе [9] было получено

$$\frac{\partial \theta}{\partial \xi}|_{\xi_s=0} \approx 0 \quad \text{и} \quad \frac{\partial \theta}{\partial \xi}|_{\xi_s=\infty} \approx -2. \quad (8)$$

Это условие можно получить при самовоспламенении горючего между двумя параллельными плоскостями одной температуры, используя решения работы [10], где начало координат отсчитывали от центра сосуда, по нормали к плоскостям. Была введена переменная $z = \frac{\partial \theta}{\partial \xi}$, и уравнение (4) приняло вид

$$z \frac{dz}{d\xi} = -2 \exp \theta. \quad (9)$$

Полагая, что при $\xi = 0$, $\theta = 0$ и $\frac{\partial \theta}{\partial \xi} = 0$, из уравнения (9) получили

$$\theta = -2 \ln \operatorname{ch} \xi. \quad (10)$$

Далее следуют наши вычисления: из уравнения (10) найдем $\frac{\partial \theta}{\partial \xi} = -2 \operatorname{th} \xi$. При $\xi \rightarrow \infty$, $\operatorname{th} \xi \rightarrow 1$, а $\frac{\partial \theta}{\partial \xi} \rightarrow -2$. То есть решения, полученные при изучении самовоспламенения [10] и обнаруженное Я.Б. Зельдовичем в работе [3], совпадают. Итак, доказано: выражение (8) является условием самовоспламенения бесконечного горючего накаленной плоской поверхностью.

Решения уравнения теплопроводности одинаковы при самовоспламенении и зажигании горю-

чего, а для определения момента теплового взрыва и его вида требуется дополнительное условие, которое находят, анализируя особенности вышеупомянутых решений (предельный поток тепла, точка перегиба и другие). Понимая это, Я.Б. Зельдович в работе [3] использовал решения работы [2] по самовоспламенению горючего между параллельными стенками одной температуры и хотел “прийти к зажиганию... при разных температурах стенок”. То есть он ошибочно полагал, что изучает профили температуры “зажигания” и, обнаружив “предельный” поток тепла, отнес его к зажиганию, не придав значение тому, что в момент зажигания, согласно условию (8), накаленная поверхность не греет и поэтому не может зажигать горючее. Что возможно, если накаленное тело велико, имеет бесконечную теплопроводность и в нем отсутствуют источники тепла. Если же накаленное тело имеет источник тепла, как в работе [11], то выполнение условия (8) невозможно из-за нарушения закона сохранения энергии.

Отметим, что Я.Б. Зельдович писал статью [3], когда не были известны результаты работ [7–11] и не использовались идеи теории катастроф [12]. Но, несмотря на очевидную ошибку и другие вышеприведенные противоречия, работа [3] долгие годы лежала в основе теории зажигания и препятствовала изучению ряда задач теплового взрыва: зажигание горючего накаленным телом было решено в работах [6–9], а решения других задач представлены в этом сообщении.

1.2. Зажигание в плоском сосуде

При $M \gg 1$ из выражения (7) следует, что градиент температуры $\frac{\partial T}{\partial r}$ слабо падает при удалении от поверхности и почти линеен при малом тепловыделении химической реакции:

$$\frac{\partial T}{\partial r} = -(T_q - T_s)/L.$$

Если L и T_s переменны, найдем $\frac{\partial^2 R}{\partial r^2} = -2(T_q - T_s)/L^2$, выражение (1) примет вид

$$\lambda(T_s - T_q)^2/L \approx Qk \exp(-E/RT_s). \quad (11)$$

Это выражение верно, когда параметры горючей системы далеки от предельных значений, так как тепловыделение химической реакции мало. Если тепловыделение незначительно и один из параметров горючей системы достигает предельной величины, то, вероятно, и в этом случае условие (11) будет справедливо. Итак, условие (11) с большой вероятностью является условием зажигания горючего в плоском сосуде с разными температурами стенок T_q и T_s .

Заметим, что исходя из “теории размерности” трудно найти другое условие зажигания, связывающее все параметры горючей системы (ширину сосуда, температуру стенок, теплопроводность горючего и кинетику химической реакции) в одно простое уравнение. Заметим, что вывод условия (11) не вытекает из особенностей профиля температуры в горючем в момент зажигания, поэтому необходима экспериментальная проверка его справедливости.

2. ОСЕВАЯ СИММЕТРИЯ

Стационарное уравнение теплопроводности в безразмерных (3), цилиндрических координатах имеет вид [5–9]:

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial \xi^2} + \frac{1}{\xi} \frac{\partial \theta}{\partial \xi} = -2 \exp \theta, \quad (12)$$

$$\theta|_{\xi=\xi_s} = 0, \quad -\frac{\partial \theta}{\partial \xi}|_{\xi=\xi_s} = M, \quad (13)$$

где $\xi_s = r_s/\ell$, r_s – радиус цилиндра.

Сделаем замену переменных [5, 9]:

$$\begin{aligned} v &= \theta + 2 \ln \xi/\xi_s, \\ \eta &= \xi_s \ln \xi/\xi_s. \end{aligned} \quad (14)$$

В новых переменных (14) система уравнений (12), (13) примет вид

$$\frac{\partial^2 v}{\partial \eta^2} + 2 \exp v = 0, \quad (15)$$

$$v|_{\eta=0} = 0, \quad -\frac{\partial v}{\partial \eta}|_{\eta=0} = M + 2/\xi_s = P. \quad (16)$$

Решение системы уравнений (15), (16) имеет вид [10]

$$-\frac{\partial v}{\partial \eta}|_{\eta=\infty} = P(1 + 4/P^2)^{0.5}. \quad (17)$$

2.1. Самовоспламенение горючего от накаливаемого цилиндра

При $P \ll 1$ из выражения (17) у поверхности и на бесконечном удалении от нее получим

$$\frac{\partial v}{\partial \eta}|_{\eta=0} = 0, \quad -\frac{\partial v}{\partial \eta}|_{\eta=\infty} = 2. \quad (18)$$

Используя уравнения (14), получим выражение (18) в координатах (3):

$$\begin{aligned} \frac{\partial \theta}{\partial \xi}|_{\xi_s=0} &= 2\ell/r_s, \\ \frac{\partial \theta}{\partial \xi}|_{\xi_s=\infty} &= 2\ell/r_s - 2. \end{aligned} \quad (19)$$

Выражение (19) является условием самовоспламенения бесконечного горючего накаливаемым цилиндром.

В трехмерном неограниченном теле при отсутствии конвекции не может существовать любой, отличный от нуля, стационарный поток тепла при реальных температурах. Поэтому условия (8), (19), полученные с помощью разложения (3) Д.А. Франк-Каменецкого, применимы только около накаливаемой поверхности, когда температура падает не более 10–20% от температуры поверхности.

2.2. Зажигание горючего газа накаливаемым цилиндром

В работах [6–9] разными способами при большом градиенте температуры $P \gg 1$ получено условие зажигания, укладывающее данные эксперимента [11] на одну прямую:

$$2b(\varphi) \frac{\lambda \text{Nu}}{d^2} (T_s - T_0) = Qk \exp\left(-\frac{E}{RT_s}\right), \quad (20)$$

где Nu – критерий Нуссельта, T_0 – температура потока горючей смеси, d – диаметр цилиндра, $b(\varphi)$ – безразмерный коэффициент, приблизительно равный 0.5.

3. СФЕРИЧЕСКАЯ СИММЕТРИЯ

Уравнение теплопроводности в сферических координатах не преобразуется в уравнение в линейных координатах заменой переменных [6]. Поэтому нельзя получить условие самовоспламенения, аналогичное (8), (19), но условие зажигания горючего накаливаемым шаром было получено и представлено в работах [7–9].

При изучении самовоспламенения в плоскопараллельном сосуде [10] обнаружено равенство потока тепла в горючем при удалении от центра сосуда и “критического потока” тепла от накаливаемой поверхности – “условие зажигания” Я.Б. Зельдовича [3]. Таким образом, доказано: условие (8) является условием самовоспламенения, что подтверждается решениями (1)–(8). Также доказано, что условие (8), полученное в работе [9], относится к самовоспламенению.

Тепловой взрыв бесконечного горючего от накаливаемой плоскости или цилиндра может протекать в режиме самовоспламенения или зажигания. Получены условия самовоспламенения бесконечного горючего накаливаемой плоскостью (8)

и цилиндром (19). Если параметры химической реакции одинаковы в обоих случаях, то самовоспламенение произойдет позже, так как оно идет при более сильном изменении профиля температуры у поверхности, что требует большей температуры поверхности T_s . Это подтверждается корреляцией данных эксперимента [11] с условием зажигания (20), а не самовоспламенения (19). Также предложено вероятное условие зажигания горючего между параллельными стенками разной температуры (11).

БЛАГОДАРНОСТИ

Автор благодарит научного руководителя ИХФ РАН академика РАН Александра Александровича Берлина за важные замечания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Семенов Н.Н. Цепные реакции. Л.: ОНТИ, 1934. С. 110.
2. Франк-Каменецкий Д.А. // Докл. АН СССР. 1938. Т. 18. С. 411.
3. Зельдович Я.Б. Теория зажигания накаленной поверхностью // ЖЭТФ. 1939. Т. 9. № 12. С. 1530–1534.
4. Франк-Каменецкий Д.А. Диффузия и теплопередача в химической кинетике. 2-е изд. М.: Наука, 1967.
5. Зельдович Я.Б., Баренблатт Г.И., Либрович В.Б., Махвиладзе Г.М. Математическая теория горения и взрыва. М.: Наука, 1980.
6. Филиппов А.А. К вопросу поджигания полимерных материалов накаленными телами. Межвузовский сборник научных трудов по химии и технологии элементоорганических полупродуктов и полимеров. Волгоград, 1984.
7. Philippov A.A., Khalturinskiy N.A. To the theory of ignition by a hot surface: critical conditions for occurrence of explosive and avalanche-like processes / Zeldovic memorial. 2015. V. 2.
8. Филиппов А.А., Берлин А.А. К теории зажигания накаленной поверхностью // Горение и взрыв. 2021. Т. 14. № 2.
9. Филиппов А.А., Берлин А.А. Математическая теория зажигания накаленной поверхностью // Доклады РАН. Физика. Технические науки. 2022. Т. 503. № 1. С. 28–34.
10. Баренблатт Г.И. Параграф 15 в статье И.М. Гельфанда. Задачи теории квазилинейных уравнений // УМН. 1959. Т. 154. № 4. С. 787–790.
11. Кузнецов С. Горение. М.: ИЛ, 1979.
12. Арнольд В.И. Теория катастроф. М.: Наука, 1990.

CRITICISM OF THE “THEORY OF INCANDESCENT SURFACE IGNITION” BY Ya.B. ZELDOVICH. SELF-IGNITION OF INFINITE FUEL BY INCANDESCENT BODIES

A. A. Philippov^a

^aN.N. Semenov Federal Research Center for Chemical Physics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Presented by Academician of the RAS A.A. Berlin

The basic principles of thermal explosion were studied and outlined by 1980. It seemed that fundamental research had been completed, but in 1984 A.A. Philippov discovered that the “ignition” condition obtained by Ya.B. Zeldovich did not correlate with the data of the experiment on ignition of a gas mixture by incandescent cylinders. Since Zeldovich’s “Theory of Incandescent surface ignition” has long been the basis of the ignition theory, its analysis was carried out and an error was found. It is proved that the above-mentioned work is not related to ignition, but to the self-ignition of infinite fuel. It is shown that a thermal explosion of fuel from an incandescent body can develop not only as ignition, but also as self-ignition. The conditions of self-ignition of infinite fuel by a flat surface and a cylinder are given, as well as the probable condition of ignition of fuel between parallel walls of different temperatures.

Keywords: thermal explosion, theory and critical conditions of self-ignition and ignition