

К СТАЦИОНАРНОЙ ТЕОРИИ ЗАЖИГАНИЯ ГАЗОВ НАГРЕТЫМ ТЕЛОМ*

А. А. Беляев¹, Б. С. Ермолаев²

Аннотация: Стационарная теория зажигания накаливаемой плоской поверхностью, сформулированная Я. Б. Зельдовичем в 1939 г., сыграла пионерскую роль в успешном развитии исследований по воспламенению различных горючих материалов. Аналитическое решение, полученное позднее для цилиндрической поверхности, открыло возможность для сравнения с экспериментальными данными. В работах, выполненных Филипповым с соавторами, было обнаружено расхождение между опытами по зажиганию метановоздушных смесей нагретыми проволоками и аналитическим решением. Опираясь на это расхождение, Филиппов с соавторами высказали сомнение в корректности модели. Однако указанное расхождение может быть вызвано тем, что эксперимент, использованный для сравнения с моделью, не в полной мере удовлетворяет тем ограничениям, которые вытекают из упрощающих предположений, сделанных при формулировке модели. Эти предположения и следующие из них ограничения анализируются в данной работе применительно к опытам Кумагаи по зажиганию метановоздушной смеси. Ключевые допущения стационарной модели зажигания: упрощенное описание кинетики химического тепловыделения с использованием глобальной одностадийной реакции Аррениусова типа без учета выгорания; условие, что толщина реакционной зоны должна быть существенно меньше толщины пограничного слоя; цилиндрическая симметрия теплового поля вокруг нагретого тела. Из анализа кинетики тепловыделения получено численное решение для двух нестационарных задач о зажигании газа нагретым телом и о самовоспламенении газа в проточном реакторе идеального вытеснения с детальной кинетикой реакций. Решение показало, что зависимость скорости тепловыделения от температуры, построенная для конкретных вариантов расчетов, имеет сложную форму, которую даже приближенно невозможно описать, используя закон тепловыделения в форме Аррениуса. Тем не менее оказалось, что критические числа Нуссельта, разграничивающие область зажигания и область стационарных температурных профилей, которые были рассчитаны по формулам аналитической модели при соответствующей процедуре калибровки характеристик тепловыделения, находятся в неплохом согласии с экспериментальными данными во всем диапазоне изменения диаметров и температур нагрева проволоки и скоростей газового потока. Также хорошее согласие с экспериментом и аналитической моделью по критическим условиям зажигания получено в расчетах по нестационарной модели зажигания, несмотря на заметные различия по скорости тепловыделения в зависимости от температуры. Условие малой толщины зоны реакции по отношению к размеру пограничного слоя, в целом, выполняется достаточно строго, хотя при высоких скоростях газового потока (на уровне 10 м/с) строгость условия становится недостаточной, чтобы исключить вклад конвективной составляющей в переносе тепла в зоне реакции. Из-за срыва пограничного слоя и формирования вихрей на поверхности нагретого тела вблизи азимутального угла 90° появляются участки с пониженной теплоотдачей, величина которой может быть заметно меньше средней величины. Именно на этих участках поверхности нагретого тела создаются условия, благоприятные для зажигания. Если провести корректировку экспериментальных данных путем соответствующего снижения критических чисел Нуссельта в указанных опытах, то это ослабит зависимость критического числа Нуссельта от диаметра проволоки, наблюдаемую в эксперименте, приближая ее к примерно пропорциональной зависимости, которая следует из аналитического решения.

Ключевые слова: цилиндрическая накаливаемая поверхность; газовая смесь; критерий зажигания; аналитические оценки; компьютерное моделирование; сравнение с экспериментом

DOI: 10.30826/CE22150301

EDN: GAINZT

Литература

1. Зельдович Я. Б. Теория зажигания накаливаемой поверхностью // ЖЭТФ, 1939. Т. 9. Вып. 12. С. 1530–1534.
2. Зельдович Я. Б., Баренблатт Г. И., Либрович В. Б., Махвиладзе Г. М. Математическая теория горения и взрыва. — М.: Наука, 1980. 478 с.

*Работа была выполнена в рамках Программы фундаментальных научных исследований РФ (номера государственной регистрации 122040500073-4 и 122040500068-0) и имела бюджетное финансирование.

¹Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук, belyaevINF@yandex.ru

²Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук, boris.ermolaev44@mail.ru

3. *Кумагаи С.* Горение / Пер. с япон. С. К. Орджоникидзе, Б. С. Ермолаева. — М.: Химия, 1979. 256 с.
4. *Philippov A. A., Khaturinskiy N. A.* To the theory of ignition by a hot surface: Critical conditions for occurrence of explosive and avalanche-like processes // Zel'dovich Memorial: Accomplishments in the combustion science in the last decade / Eds. A. A. Borisov, S. M. Frolov. — Moscow: TORUS PRESS, 2015. Vol. 2. P. 89–94.
5. *Филиппов А. А., Берлин А. А.* К теории зажигания накаливаемой поверхностью // Горение и взрыв, 2021. Т. 14. № 2. С. 3–7.
6. *Зельдович Я. Б.* Избранные труды. Химическая физика и гидродинамика. — М.: Наука, 1984. 374 с. (Комментарий к статье «Теория зажигания накаливаемой поверхностью». С. 225.)
7. *Гребер Г., Эрк С., Григуль У.* Основы учения о теплообмене / Пер. с нем. — М.: ИЛ, 1958. 565 с. (*Gröber H., Erk S., Grigull U.* Die Grundgesetze der Wärmeübertragung. — Berlin–Göttingen–Heidelberg: Springer, 1955. 428 p.)
8. *Франк-Каменецкий Д. А.* Диффузия и теплопередача в химической кинетике. — М.: Наука, 1987. 502 с.
9. ANSYS Academic Research CFD. CHEMKIN-Pro 15112, Reaction Design: San Diego, СК-TUT-10112-1112-UG-1, 2011.
10. *Кутателадзе С. С.* Теплопередача и гидродинамическое сопротивление. — М.: Энергоатомиздат, 1990. 367 с.
11. *Рид Р., Праусниц Дж., Шервуд Т.* Свойства газов и жидкостей / Пер. с англ. — Л.: Изд-во Химия, 1982. 592 с. (*Reid R., Prausnitz J., Sherwood T.* Properties of gases & liquids. — New York, NY, USA: McGraw Hill, 1977. 703 p.)
12. *Burcat A.* Ideal gas thermodynamic data in polynomial form for combustion and air pollution use. <http://garfield.chem.elte.hu/Burcat/burcat.html/>.
13. *Тереза А. М., Агафонов Г. Л., Бетев А. С., Медведев С. П.* Редуцирование детального кинетического механизма для эффективного моделирования задержек воспламенения смесей метана и ацетилена с кислородом // Хим. физика, 2020. Т. 39. № 12. С. 29–36.
14. Mechanism Downloads. AramcoMech 3.0, 2018. <http://c3.nuigalway.ie/combustionchemistrycentre/mechanismdownloads/>.
15. *Арутюнов В. С.* Окислительная конверсия природного газа. — М.: КРАСАНД, 2011. 640 с.
16. *Шлихтинг Г.* Теория пограничного слоя / Пер. с нем. Г. А. Вольперта под ред. Л. Г. Лойцянского. — М.: Наука, 1974. 712 с. (*Schlichting G.* Boundary layer-theory. — McGraw-Hill, Inc., 1979. 817 p.)
17. *Басевич В. Я., Беляев А. А., Посвянский В. С., Фролов С. М.* Механизм окисления и горения нормальных парафиновых углеводородов: переход от C₁–C₁₀ к C₁₁–C₁₆ // Хим. физика, 2013. Т. 32. № 4. С. 87–96.
18. *Басевич В. Я., Фролов С. М.* Кинетика «голубых» пламен при газофазном окислении и горении углеводородов и их производных // Успехи химии, 2007. Т. 76. № 9. С. 927–944.
19. *Салганский Е. А., Цветков М. В., Зайченко А. Ю., Подлесный Д. Н., Седов И. В.* Термодинамическая оценка режимов некаталитической конверсии природного газа с получением синтез-газа // Хим. физика, 2021. Т. 40. № 11. С. 14–21.

Поступила в редакцию 22.06.2022