

# ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛИ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ ГОРЮЧЕГО СПРЕЯ, СОДЕРЖАЩЕГО КАПЛИ ЖИДКОГО ТОПЛИВА

А.Ж. Агатаева

Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет) (СГАУ), Самара, Россия

Статья посвящена исследованию модели горения газа, содержащего капли жидкого топлива. Подобные горючие смеси являются типичными для двигателей внутреннего сгорания. Предполагается, что капли достаточно малы. Поведение таких систем обусловлено двумя процессами: теплотерями за счет испарения жидкого горючего (капель) и тепловыделения, связанного с экзотермической реакцией окисления в газовой фазе. Показано, что математическая модель такого процесса представлена в виде сингулярно возмущенной системы обыкновенных дифференциальных уравнений. На основе качественного анализа установлено существование различные виды режимов химической реакции, в том числе и критического.

**Ключевые слова:** интегральное многообразие, сингулярные возмущения, спрей, теория горения, критический режим, тепловой взрыв.

Данная статья посвящена качественному и численному исследованию динамической модели воспламенения горючего спрея, содержащего капли жидкого топлива. Особенности горения и теплового взрыва в газовой среде, хорошо известны и широко представлены различными публикациями. Тем не менее, влиянию капель жидкости на динамику такого процесса уделялось меньше внимания. По существу, поведение таких систем обусловлено двумя процессами: потери тепла за счет испарения горючей жидкой среды (капель) и выделением тепла, связанного с экзотермической реакции окисления в газовой фазе. Конкуренция между этими процессами определяет основные динамические особенности систем.

Математическая модель разработана как система нелинейных обыкновенных дифференциальных уравнений: уравнение энергии для реагирующего газа, массового уравнения для жидких капель и уравнения для концентрации горючего компонента газовой смеси. Модель построена при обычных для теории горения предположениях однородности химических процессов в каждой точке реакционного сосуда [1]. В безразмерном виде математическая модель воспламенения горючего спрея, содержащего капли жидкого топлива описывается системой [2]:

$$\begin{aligned} \gamma \frac{d\theta}{d\tau} &= \eta \exp\left(\frac{\theta}{1+\beta\theta}\right) - \varepsilon_1 r \theta (1+\beta\theta), \\ \frac{d(r^3)}{d\tau} &= -\varepsilon_1 \varepsilon_2 r \theta, \\ \frac{d\eta}{d\tau} &= -\eta \frac{1}{1+\beta\theta} \exp\left(\frac{\theta}{1+\beta\theta}\right) + \varepsilon_1 \nu r \theta, \end{aligned}$$

где  $\theta$  – безразмерная температура горючего газа,  $r$  – безразмерный радиус капли,  $\eta$  – безразмерная концентрация горючего газа,  $\tau$  – безразмерное время,  $\gamma$  – безразмерный па-

раметр, равный конечной безразмерной адиабатической температуре термически изолированной системы после взрыва,  $\beta$  – приведенная начальная температура,  $\varepsilon_1, \varepsilon_2$  – характеризуют взаимодействие между газовой и жидкой фазами,  $\psi$  – параметр, характеризующий отношение энергии сгорания газовой смеси к жидкой энергии испарения.

В безразмерном виде модель представлена в виде сингулярно возмущенной системы обыкновенных дифференциальных уравнений, что позволяет применить для ее анализа геометрические методы теории сингулярных возмущений [3]. На основе анализа нулевого приближения медленного интегрального многообразия системы (медленной кривой) установлено существование трех основных типов режимов химической реакции в зависимости от значений дополнительных параметров системы. Такими режимами являются безопасный медленный режим горения, быстрый режим (режим типичного теплового взрыва) и режим теплового взрыва с задержкой. В последнем режиме есть фаза медленного разогрева системы перед тем, как процесс перейдет в взрывную фазу. Установлено существование критического режима, который разделяет области безопасных реакций и опасные, взрывные процессы. Применение геометрической теории сингулярных возмущений позволило также получить условия протекания критического режима в аналитической форме.

## Литература

1. Мержанов, А.Г. Современное состояние теории теплового взрыва / А.Г. Мержанов, Ф.И. Дубовицкий // Успехи химии. – 1966. – Т. 35, вып. 4. – С. 656–682.
2. Соболев, В.А. Редукция моделей и критические явления в макрокинетике / В.А. Соболев, Е.А. Щепаккина. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010. – 320 с.
3. Goldfarb, I. Liquid Drop Effects on Self-Ignition of Combustible Gas / I. Goldfarb, V. Gol'dshtein, I. Shreiber, A. Zinoviev // Proceedings of the 26th Symposium (International) on Combustion. – Pittsburgh, PA: The Combustion Institute, 1996. – P. 1557–1563.