

УДК 536.468

**ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ УСЛОВИЙ ФАЗОВЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ И ХИМИЧЕСКОГО РЕАГИРОВАНИЯ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ЛОКАЛЬНОГО ИСТОЧНИКА НАГРЕВА НА ЖИДКИЕ КОНДЕНСИРОВАННЫЕ ВЕЩЕСТВА**

© 2011 г.

*П.А. Стрижак*

Томский политехнический университет

pavelspa@tpu.ru

*Поступила в редакцию 16.05.2011*

Представлены физическая постановка, математическая модель и алгоритм численного решения наиболее общей задачи тепломассопереноса при зажигании жидкого конденсированного вещества источником ограниченной энергоемкости. Установлены масштабы влияния группы факторов на характеристики процессов тепломассопереноса в сложных системах «источник ограниченной энергоемкости–жидкое конденсированное вещество–окислитель».

*Ключевые слова:* тепломассоперенос, фазовые переходы, химическое реагирование, зажигание, математическое моделирование, жидкие конденсированные вещества.

**Введение**

Статистика причин аварий и травматизма на опасных производственных объектах последних лет [1] показывает, что наиболее пожаро- и взрывоопасными являются предприятия химической, нефтехимической и нефтеперерабатывающей отраслей промышленности. Это обусловлено тем, что на таких объектах достаточно много жидких горючих веществ и потенциальных источников зажигания ограниченной энергоемкости (разогретые до высоких температур металлические и неметаллические частицы малых размеров, проволоочки, стержни, сфокусированные потоки излучения и т.д.). В связи с этим актуальны [1] задачи исследований механизмов зажигания жидких конденсированных веществ, характеристик этих процессов и предельных условий их реализации.

За последние годы создана группа моделей тепломассопереноса [2, 3] для численного анализа закономерностей зажигания жидких конденсированных веществ (КВ) источниками ограниченной энергоемкости. При построении моделей, учитывающих нагрев и испарение жидкости с поглощением тепла, диффузионно-конвективный перенос паров горючего в среде окислителя, остывание и кристаллизацию материала источника энергии с выделением тепла, радиационный теплоотвод от источника, формирование парового зазора между источником и жидкостью, а также погружение источника в жидкое вещество, применялись модели

[4, 5] и основные положения классических монографий [6, 7].

**Математическая модель**

В наиболее общей постановке предполагалось, что типичный источник ограниченной энергоемкости – металлическая частица – падает на поверхность широко распространенного топлива – мазута, частично погружается в него и нагревает топливо. При достижении условий фазового перехода начинается процесс испарения. Между источником нагрева и жидкостью формируется паровой зазор. Вследствие испарения мазута пары горючего поднимаются вверх и диффундируют в воздух. Формируется способная к воспламенению парогазовая смесь. Условия воспламенения смеси реализуются при достижении критических значений концентрации паров мазута и температуры парогазовой смеси.

Исследования выполнялись для частицы в форме диска размерами  $r_p, z_p$ . Решалась осесимметричная задача в цилиндрической системе координат.

Принимались традиционные для классической теории зажигания условия воспламенения.

1. Тепло, выделяемое в результате химической реакции паров горючего с окислителем, больше тепла, передаваемого от частицы жидкому КВ и в воздух.

2. Температура парогазовой смеси превышает начальную температуру частицы.

Для описания комплекса процессов тепло-массопереноса с фазовыми переходами и химическим реагированием при зажигании жидкого топлива разогретой частицей использована следующая система нелинейных нестационарных дифференциальных уравнений неразрывности, движения, энергии, диффузии и баланса парогазовой смеси, а также теплопроводности в жидкой и твердой фазах:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 \psi}{\partial r^2} - \frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial r} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} &= -r\omega, \quad \frac{\partial \omega}{\partial t} + u \frac{\partial \omega}{\partial r} + w \frac{\partial \omega}{\partial z} - \\ - \frac{\omega u}{r} &= \nu \left( \frac{\partial^2 \omega}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \omega}{\partial r} + \frac{\partial^2 \omega}{\partial z^2} - \frac{\omega}{r^2} \right) + g\beta \frac{\partial T_4}{\partial r}; \\ \rho_4 C_4 \left[ \frac{\partial T_4}{\partial t} + u \frac{\partial T_4}{\partial r} + w \frac{\partial T_4}{\partial z} \right] &= \\ = \lambda_4 \left[ \frac{\partial T_4^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_4}{\partial r} + \frac{\partial T_4^2}{\partial z^2} \right] + Q_o W_o; \\ \frac{\partial C_f}{\partial t} + u \frac{\partial C_f}{\partial r} + w \frac{\partial C_f}{\partial z} &= D_3 \left[ \frac{\partial C_f^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial C_f}{\partial r} + \right. \\ \left. + \frac{\partial C_f^2}{\partial z^2} \right] - \frac{W_o}{\rho_4} \frac{C_3 R_t T_p^2}{E Q_o}; \quad C_f + C_o &= 1; \\ \frac{\partial T_2}{\partial t} &= a_2 \left[ \frac{\partial T_2^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_2}{\partial r} + \frac{\partial T_2^2}{\partial z^2} \right]; \\ \frac{\partial T_1}{\partial t} &= a_1 \left[ \frac{\partial T_1^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_1}{\partial r} + \frac{\partial T_1^2}{\partial z^2} \right] + \frac{W_c Q_c}{z_p \rho_1 C_1}. \end{aligned}$$

Здесь  $t$  – время, с;  $t_d$  – время задержки воспламенения, с;  $r, z$  – координаты цилиндрической системы;  $r_L, z_L$  – размеры области решения, м;  $\psi$  – функция тока, м<sup>2</sup>/с;  $\omega$  – вектор вихря скорости, с<sup>-1</sup>;  $u, w$  – составляющие скорости конвекции смеси паров горючего и окислителя в проекции на ось  $r$  и  $z$  соответственно, м/с;  $\nu$  – кинематическая вязкость, м<sup>2</sup>/с;  $T$  – температура, К;  $T_p$  – начальная температура частицы, К;  $\beta$  – коэффициент термического расширения, К<sup>-1</sup>;  $g$  – ускорение свободного падения в проекции на ось  $z$ , м/с<sup>2</sup>;  $\rho$  – плотность, кг/м<sup>3</sup>;  $C$  – удельная теплоемкость, Дж/(кг·К);  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К);  $Q_o$  – тепловой эффект реакции окисления паров горючего в воздухе, МДж/кг;  $W_o$  – массовая скорость окисления паров горючего в воздухе, кг/(м<sup>3</sup>·с);  $C_f$  – концентрация паров жидкого горючего вещества;  $D$  – коэффициент диффузии паров горючего в воздухе, м<sup>2</sup>/с;  $R_t$  – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К);  $E$  – энергия активации, кДж/моль;  $C_o$  – концентрация окислителя;  $a$  – коэффициент температуропроводности, м<sup>2</sup>/с;  $W_c$  – массо-

вая скорость кристаллизации материала частицы, кг/(м<sup>2</sup>·с);  $Q_c$  – тепловой эффект кристаллизации материала частицы, кДж/кг.

## Результаты и обсуждение

В таблицах 1, 2 представлены зависимости времен задержки воспламенения мазута  $t_d$  от начальной температуры частицы  $T_p$  и ее размеров соответственно.

Таблица 1

$T_p$ , К	1513	1473	1433	1393	1353
$t_d$ , с	0.0164	0.0176	0.0191	0.0417	0.0655
$T_p$ , К	1313	1273	1243		
$t_d$ , с	0.1134	0.2117	нет воспламенения		

Таблица 2

$r_p$ , м	0.0045	0.0040	0.0035	0.0030	0.0025
$t_d$ , с	0.0694	0.0802	0.0967	0.1134	0.1365
$r_p$ , м	0.0020	0.0015	0.0010		
$t_d$ , с	0.1728	0.2239	нет воспламенения		

Из таблиц видно, что инерционность исследуемого процесса зажигания существенно зависит от теплосодержания частицы, которое определяется начальной температурой  $T_p$  и размерами  $r_p, z_p$ . Также в [3, 4] приведены результаты исследования масштабов влияния параметров жидкостей, окружающей среды и процессов на характеристики зажигания.

Результаты выполненных исследований позволяют сделать вывод о том, что предложенная модель тепло-массопереноса может быть использована для анализа процессов взаимодействия типичных жидких конденсированных веществ с различными источниками нагрева ограниченной энергоемкости.

*Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента РФ (МК-330.2010.8).*

### Список литературы

- Акинин Н.И., Булхов Н.Н., Герш В.А. Статистический анализ причин аварий и травматизма на опасных производственных объектах // Пожаровзрывобезопасность. 2010. №10. С. 53–55.
- Kuznetsov G.V., Strizhak P.A. On peculiarities of heat and mass transfer in a hot metal particle – liquid fuel condensed substance – air system // Journal of Engineering Thermophysics. 2009. No 3. P. 241–248.
- Кузнецов Г.В., Стрижак П.А. Зажигание конденсированных веществ при локальном нагреве. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2010. 269 с.

4. Kuznetsov G.V., Sheremet M.A. Conjugate natural convection with radiation in an enclosure // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2009. V. 52. Is. 9–10. P. 2215–2223.
5. Kuznetsov G.V., Sheremet M.A. Mathematical modeling of complex heat transfer in a rectangular enclosure // Thermophysics and Aeromechanics. 2009. V. 16, No 1. P. 119–128.
6. Роуч П.Дж. Вычислительная гидродинамика. М.: Мир, 1980. 616 с.
7. Седов Л.И. Механика сплошной среды. М.: Наука, 1994. Т. 1. 528 с.

**NUMERICAL INVESTIGATION OF THE CONDITIONS FOR PHASE CHANGES AND CHEMICAL REACTION IN THE INTERACTION OF A LOCAL HEATING SOURCE WITH LIQUID CONDENSED SUBSTANCES**

*P.A. Strizhak*

A physical formulation, a mathematical model and an algorithm of numerical solution of the general heat and mass transfer problem for the ignition of a liquid condensed substance by a source with limited heat content are presented. The influence scale of a group of significant factors on the characteristics of heat and mass transfer processes in the complex systems «source with limited heat content–liquid condensed substance–oxidizer» is assessed.

*Keywords:* heat and mass transfer, phase changes, chemical reaction, ignition, mathematical modelling, liquid condensed substances.