

**ОЦЕНКА КРИТИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ
ДИСПЕРГИРОВАННОГО МАГНИЯ В ВОДЯНОМ ПАРЕ**

В.В. Аксенов, В.М. Юлкова**

*Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова

Экспериментально и аналитически исследован процесс воспламенения диспергированного магния в водяном паре. В эксперименте в контролируемых условиях по температуре и расходу окислителя (водяного пара) находились критические температуры воспламенения диспергированного металла (тонкодисперсной стружки магния толщиной 0,07 мм), предел воспламенения которого определялся по резкому увеличению времени задержки воспламенения вблизи критической температуры. Аналитически критические температуры воспламенения магния в водяном паре рассчитывались по математической модели, согласно которой диспергированный магнием рассматривался как совокупность частиц, равномерно распределенных в газовом объеме и представляющих собой систему с объемными источниками тепловыделения, мощность которых зависит от концентрации частиц металла и их размеров. При этом предполагалось, что такие частицы участвуют в конвективном и радиационном теплообмене между собой и окружающей средой при наличии химической реакции взаимодействия магния с водяным паром, протекающей на их поверхности. Показано, что при известной кинетике, определяющей скорость взаимодействия металла с газообразным окислителем, математическая модель, используемая в работе, позволяет производить количественные расчеты критических температур воспламенения диспергированного металла или макрокинетических констант по известным из эксперимента критическим температурам. Установлено, что воспламенение диспергированного магния в водяном паре происходит гетерогенно. При этом если интенсивность внутреннего теплообмена между диспергированным магнием и водяным паром в газодисперсной системе оказывается гораздо меньше интенсивности теплообмена системы с окружающей средой, то уравнение, определяющее критические условия воспламенения диспергированного магния в водяном паре, переходит в уравнение, определяющее критические условия воспламенения отдельного образца в этом окислителе.

Ключевые слова: воспламенение, время индукции, диспергированный магний, газообразный окислитель.

Перспективными направлениями современной структурной макрокинетики [1, 2] являются исследование и реализация процессов горения, используемых для промышленного синтеза веществ и материалов, в т. ч. и водорода.

Как известно, водород может быть получен в результате низкотемпературного окисления магниевых сплавов в воде [3]. Вместе с тем более перспективным, на наш взгляд, является получение водорода в реакции взаимодействия магния с водяным паром, протекающей в ре-

Контактное лицо: Аксенов Василий Викторович, адрес: 163002, г. Архангельск, наб. Северной Двины, д. 22; e-mail: vasvikaks@gmail.com

жиге горения, т. к. скорость выхода водорода при переходе от режима низкотемпературного окисления в воде к режиму высокотемпературного горения в водяном паре возрастает на несколько порядков [4].

Скорость взаимодействия магния с водяным паром существенно зависит от площади реагирования металла, поэтому для интенсификации выхода водорода целесообразно использовать диспергированный магний, а окислитель (водяной пар) продувать через слой этого металла, осуществляя режим горения, для реализации которого необходимо исследовать процесс воспламенения диспергированного магния в водяном паре.

Основное внимание в известной нам литературе [5–15] уделялось экспериментальному и теоретическому исследованию воспламенения и горения магния в кислороде, азоте и оксидах углерода. Однако воспламенение и горение магния в водяном паре изучено в меньшей степени. В частности, О. Кубашевским и Б. Гобкинсом [16] установлен линейный закон окисления магния в диапазоне давлений водяного пара 4,1–28 кПа и интервале температур 696–773 К, а при более высоких давлениях представлена лишь качественная картина этого процесса в интервале температур 773–848 К. Г.К. Ежовским и его коллегами [17] по пределам воспламенения найдены константы, определяющие кинетику взаимодействия мелких (до 250 мкм) и крупных (0,5–1,5 мм) магниевых частиц в чистом водяном паре и в смеси пара с азотом. Нами же ранее исследована динамика процесса воспламенения одиночных магниевых образцов в водяном паре [4]. Отметим, что результаты в данных исследованиях получены для отдельных образцов (частиц металла). Однако процессы воспламенения отдельных частиц металла и их совокупностей могут существенным образом отличаться. Поэтому задача исследования процесса воспламенения диспергированного магния в водяном паре представляется актуальной.

Воспламенение газодисперсных систем происходит при достижении критических ус-

ловий [1, 18, 19] с последующим переходом в режим горения. Поэтому целью настоящей работы являлась экспериментальная и расчетная оценка критических условий воспламенения диспергированного магния в водяном паре.

В эксперименте находились критические температуры (пределы воспламенения) диспергированного металла (тонкодисперсной магниевой стружки толщиной 0,07 мм) в газобразном окислителе – водяном паре. Проба с диспергированным металлом устанавливалась в вертикальную реакционную камеру в тонкой кварцевой трубке диаметром 11 мм, через которую по обогреваемой магистрали продувался водяной пар со скоростью от 1,5 до 7,7 м/с, расход пара контролировался с помощью реометров.

Температуры пара и стенки реакционной камеры регулировались независимо с помощью секционных нагревателей и контролировались с помощью термопар, что позволяло поддерживать необходимый температурный режим на измерительном участке реакционной камеры с требуемой точностью.

Вспышка металла фиксировалась визуально через смотровую щель в реакционной камере.

Как известно, вблизи критической температуры (предела воспламенения) происходит резкое увеличение времени индукции (задержки воспламенения) [1, 18, 19]. Поэтому в эксперименте предел воспламенения определялся по резкому увеличению задержки воспламенения диспергированного магния вблизи критической температуры.

Расчетные оценки критических условий воспламенения диспергированного магния в водяном паре производились по математической модели, согласно которой диспергированный металл представлялся, как и в [19], как совокупность частиц, равномерно распределенных в газовом объеме. При этом такая совокупность рассматривалась как система с объемными источниками тепловыделения, мощность которых зависит от концентрации частиц магния, их размеров и

скорости химической реакции на поверхности металла.

Газодисперсная система рассматривалась как однородная среда в предположении, что размеры системы гораздо больше расстояний между частицами металла. Пространственной неоднородностью поля температур в газодисперсной системе в процессе ее предпламенного разогрева пренебрегали ($Bi < 0,1$).

Считалось, что условия воспламенения газодисперсной системы зависят от соотношения суммарного тепловыделения в системе за счет химической реакции диспергированного магния с водяным паром и теплоотвода от системы в окружающую среду.

Выгорание металла за индукционный период и диффузионное сопротивление переносу окислителя вглубь газодисперсной системы при расчете критических температур воспламенения диспергированного магния считались несущественными.

Температуры частиц металла предполагались одинаковыми по всему объему газодисперсной системы. При этом считалось, что температуры частиц металла отличаются от температуры газа, которая также полагалась одинаковой во всей газовой фазе.

Запишем в этих приближениях уравнения теплового баланса для горючего (диспергированного металла)

$$M_m C_m \frac{dT_s}{dt} = qk_* \rho^v n^v \exp\left(-\frac{E}{RT_s}\right) \times S_r - \alpha_s S_r (T_s - T) - \varepsilon_s \sigma S_f (T_s^4 - T_w^4), \quad (1)$$

$$T_s(0) = T_0,$$

и газа

$$M_r C_r \frac{dT}{dt} = \alpha_s S_r (T_s - T) - \alpha_f S_f (T - T_e),$$

$$T(0) = T_0,$$

в которых M_m , C_m – масса и удельная теплоемкость горючего соответственно; T_s , T , T_w , T_e – температуры горючего, газа, стенки реакционной камеры и окружающей среды соответственно; t – время; q – тепловой эффект реакции

на единицу массы окислителя; k_* – предэкспоненциальный множитель; ρ – плотность газа; n – массовая концентрация окислителя; ν – порядок реакции по окислителю; E – энергия активации; R – универсальная газовая постоянная; S_r – площадь поверхности металла; α_s – коэффициент теплоотдачи частицы горючего; ε_s – эффективная степень черноты поверхности металла; σ – постоянная Стефана–Больцмана; S_f , α_f – площадь поверхности системы и коэффициент теплоотдачи соответственно; M_r , C_r – масса и теплоемкость газа соответственно.

Полагая, что процесс прогрева системы является квазистационарным, т. е. выполняется условие

$$\alpha_s S_r (T_s - T) = \alpha_f S_f (T - T_e),$$

выразим температуру газа через температуру частиц и температуру окружающей среды:

$$T = \frac{AT_s + T_e}{A + 1}. \quad (2)$$

При этом параметр A определяется как

$$A = \frac{\alpha_r S_r}{\alpha_f S_f}. \quad (3)$$

С учетом (2) и (3) уравнение (1) преобразуется к следующему виду:

$$M_m C_m \frac{dT_s}{dt} = qk_* \rho^v n^v \exp\left(-\frac{E}{RT_s}\right) \cdot S_r - \alpha_s S_r \frac{T_s - T_e}{A + 1} - \varepsilon_s \sigma S_f (T_s^4 - T_w^4), \quad (4)$$

$$T_s(0) = T_0.$$

Так как вблизи предела воспламенения [1, 18, 19]

$$|T_s - T_e| \ll T_e,$$

следовательно,

$$(T_s^4 - T_w^4) \cong 4T_e^3 (T_s - T_e) + T_e^4 (1 - a), \quad (5)$$

где $a = (T_w / T_e)^4$.

Преобразуя (4) с помощью (5), получим:

$$M_m C_m \frac{dT_s}{dt} = qk_* \rho^v n^v \exp\left(-\frac{E}{RT_s}\right) \cdot S_r - \frac{\alpha_s S_r (1 + \psi_R)}{A + 1} (T_s - T^*), \quad (6)$$

$$T_s(0) = T_0.$$

При этом

$$\psi_R = \frac{\varepsilon_s \sigma S_f (A+1) 4T_e^3}{\alpha_s S_r}, \quad (7)$$

а

$$T^* = \left[1 - \frac{1}{4} \frac{\psi_R (1-a)}{1 + \psi_R} \right].$$

Полагая, что вблизи предела воспламенения

$$|T_s - T^*| \ll T^*,$$

произведем разложение экспоненты по Д.А. Франк-Каменецкому [1, 18]:

$$\exp\left(-\frac{E}{RT_s}\right) \cong \exp\left(-\frac{E}{RT^*}\right) \exp\left[\frac{E}{RT^{*2}}(T_s - T^*)\right]. \quad (8)$$

Обозначим

$$\theta_s^* = \frac{E}{RT^{*2}}(T_s - T^*) \quad (9)$$

и преобразуем с помощью (8) и (9) уравнение (6) к виду:

$$\frac{d\theta_s^*}{d\tau^*} = \alpha_c^* \exp(\theta_s^*) - (1 + \psi_R) \theta_s^*, \quad (10)$$

$$\tau^* = 0, \quad \theta_s^* = \theta_0^*,$$

где

$$\tau^* = t \frac{qk_* \rho^v n^v \exp\left(-\frac{E}{RT^*}\right) S_r}{M_m C_m (RT^{*2} / E)};$$

$$\alpha_c^* = \frac{(A+1) qk_* \rho^v n^v \exp\left(-\frac{E}{RT^*}\right)}{\alpha_s (RT^{*2} / E)}.$$

Связь между параметрами на пределе воспламенения находится из уравнения (10) с использованием условий теплового взрыва [1, 18]:

$$\frac{\alpha_c^*}{1 + \psi_R} = \frac{1}{e}. \quad (11)$$

Используя (11), можно найти (при известной кинетике) предел воспламенения либо (при известных критических температурах) определить кинетические константы.

При проведении расчетов пределов воспламенения диспергированного магния в водяном

паре теплофизические свойства водяного пара и металла принимались по рекомендациям Н.Б. Варгафтика [20], С. Бретшнайдера [21] и Г.В. Рейнора [22], коэффициенты теплообмена находились с использованием работы С.С. Кутателадзе [23], а макрокинетические константы, определяющие скорость взаимодействия твердого магния с водяным паром, принимались по нашим ранее полученным данным [4].

В результате численного решения уравнения (11) критические температуры воспламенения диспергированного магния в водяном паре были получены расчетным путем с точностью $\pm 0,5$ К.

Сопоставление расчетных и экспериментальных значений критических температур воспламенения диспергированного магния в водяном паре указывает на их близость и соответствие в пределах погрешности эксперимента и точности расчета. Например, в эксперименте критическая температура воспламенения диспергированного магния в водяном паре при плотности упаковки металла в пробе 90 кг/м^3 и скорости газового потока $2,0 \text{ м/с}$ составила $(695 \pm 2) \text{ К}$, а расчетное значение критической температуры равнялось $(694,0 \pm 0,5) \text{ К}$, что указывает на возможность практического использования изложенной выше математической модели для оценки критических температур воспламенения диспергированного металла в газообразном окислителе.

С помощью уравнения (11) была решена и обратная задача: по известным из эксперимента критическим температурам была рассчитана энергия активации в реакции взаимодействия диспергированного магния с водяным паром. Установлено, что значение данной величины в пределах погрешности эксперимента и точности расчета хорошо согласуется со значением энергии активации, полученным нами ранее для одиночных образцов (частиц магния) [4]. При этом для диспергированного магния отношение E/R составило $20,7 \text{ кК}$, в то время как для одиночных частиц металла эта величина равнялась $20,4 \text{ кК}$.

Можно полагать, следовательно, что кинетическая информация, полученная при исследовании

довании динамики процесса воспламенения отдельных частиц металла, может быть использована и для проведения количественных расчетов в процессах воспламенения газодисперсных систем. При этом процесс воспламенения диспергированного магния, как и одиночных частиц металла, протекает гетерогенно.

Отметим, что параметр A , входящий в уравнения (3) и (11), можно рассматривать как критерий, определяющий соотношение интенсивностей теплообмена между частицами металла и газовой фазой в газодисперсной системе и газодисперсной системы в целом с окружающей эту систему средой.

При малых значениях параметра A , т. е. при $A \ll 1$, уравнение (11), описывающее критические условия воспламенения диспергированного магния в водяном паре, переходит в уравнение, определяющее критические условия воспламенения отдельной частицы этого металла в водяном паре [4]. Следовательно, при малых значениях параметра A совокупность частиц металла воспламеняется так же, как и отдельная частица магния.

Уравнение (11) позволяет оценить также и влияние радиационного теплообмена на критические условия воспламенения диспергированного магния в водяном паре, определяемое параметром ψ_R (см. (7)). Анализ показывает, что при увеличении параметра ψ_R критическая

температура, при которой происходит воспламенение диспергированного магния в водяном паре, уменьшается. Если же этот параметр оказывается достаточно малым, т. е. при $\psi_R \ll 1$, влияние радиационного теплообмена на критические условия воспламенения диспергированного магния в водяном паре становится незначительным.

Таким образом, можно полагать, что воспламенение диспергированного магния в водяном паре, так же как и отдельных частиц металла, происходит гетерогенно. При этом если интенсивность внутреннего теплообмена между диспергированным металлом и окислителем (водяным паром) в газодисперсной системе оказывается гораздо меньше интенсивности теплообмена системы в целом с окружающей средой, то уравнение, определяющее критические условия воспламенения диспергированного магния в водяном паре, переходит в уравнение, определяющее критические условия воспламенения отдельного образца в этом окислителе.

Установлено, что математическая модель, используемая в работе, позволяет производить количественные расчеты критических температур воспламенения диспергированного металла или макрокинетических констант по известным из эксперимента критическим температурам.

Список литературы

1. Рогачов А.С., Мукасьян А.С. Горение для синтеза материалов: введение в структурную макрокинетическую теорию. М., 2013. 400 с.
2. Baras F., Kondepudi D.K., Bernard F. Combustion synthesis of MoSi_2 and $\text{MoSi-Mo}_5\text{Si}_3$ composites: Multilayer modeling and control of the microstructure // J. Alloys Compounds. 2010. Vol. 505. P. 43–53.
3. Фоломеев А.И., Кольцов С.И. О механизме взаимодействия магниевых сплавов с водой // Журн. приклад. химии. 1989. Т. 62, № 3. С. 704–706.
4. Аксенов В.В., Юлкова В.М. Динамика процесса воспламенения частицы магния в водяном паре // Вестн. Сев. (Арктич.) федер. ун-та. Сер.: Естеств. науки. 2015. № 4. С. 111–118.
5. Бржустовский Т., Глассмен И. Парофазные диффузионные пламена при горении магния и алюминия // Гетерогенное горение. М., 1967. С. 91–163.
6. Гольдшлегер У.И., Шафирович Е.Я. Режимы горения магния в оксидах углерода. 1. Горение в CO_2 // Физика горения и взрыва. 1999. Т. 35, № 6. С. 42–49.

7. Гольдшлегер У.И., Шафирович Е.Я. Режимы горения магния в оксидах углерода. 2. Горение в СО // Физика горения и взрыва. 2000. Т. 36, № 2. С. 67–73.
8. Гольдшлегер У.И., Амосов С.Д. Режимы горения и механизмы высокотемпературного окисления магния в кислороде // Физика горения и взрыва. 2004. Т. 40, № 3. С. 28–39.
9. Гуревич М.А., Степанов А.М. Воспламенение металлической частицы // Физика горения и взрыва. 1968. Т. 4, № 3. С. 334–342.
10. Деревяга М.Е., Стесик Л.Н., Федорин Э.А. Режимы горения магния // Физика горения и взрыва. 1978. Т. 14, № 5. С. 3–10.
11. Федоров А.В., Тропин Д.А. Математическая модель воспламенения магния в расширенном диапазоне параметров // Физика горения и взрыва. 2008. Т. 44, № 5. С. 64–71.
12. Федоров А.В., Шульгин А.В. Моделирование горения частицы магния // Физика горения и взрыва. 2009. Т. 45, № 6. С. 20–25.
13. Шевцов В.И. Модель парофазного окисления частиц металлов // Физика горения и взрыва. 1996. Т. 32, №3. С. 95–101.
14. Cassel H.M., Liebman I. Combustion of Magnesium Particles II Ignition Temperatures and Thermal Conductivities of Ambient Atmospheres // Combustion and Flame. 1963. Vol. 7, № 1. P. 79–81.
15. Ягодников Д.А. Воспламенение и горение газодисперсных систем на основе металлических горючих // Законы горения / под общ. ред. Ю.В. Полежаева. М., 2006. С. 160–183.
16. Кубашевский О., Гопкинс Б. Окисление металлов и сплавов. М., 1965.
17. Ежовский Г.К., Мочалова А.С., Озеров Е.С., Юринов А.А. Воспламенение и горение частицы магния // Горение и взрыв: материалы IV Всесоюз. симп. по горению и взрыву. М., 1972. С. 234–240.
18. Франк-Каменецкий Д.А. Основы макрокинетики. Диффузия и теплопередача в химической кинетике. М., 2008.
19. Озеров Е.С. Основы теории воспламенения газодисперсных систем. Л., 1978.
20. Vargaftik N.B., Vinogradov Yu.K., Yargin V.S. Handbook of Physical Properties of Liquids and Gases. N.Y., 1996.
21. Бретинайдер С. Свойства газов и жидкостей. М.; Л., 1966.
22. Рейнор Г.В. Металловедение магния и его сплавов. М., 1964.
23. Кутателадзе С.С. Основы теории теплообмена. Новосибирск, 1970.

References

1. Rogachov A.S., Mukas'yan A.S. *Gorenie dlya sinteza materialov: vvedenie v strukturnuyu makrokinetiku* [Combustion for the Synthesis of Materials: an Introduction to Structural Macrokinetics]. Moscow, 2013. 400 p.
2. Baras F., Kondepudi D.K., Bernard F. Combustion Synthesis of MoSi₂ and MoSi-Mo₅Si₃ Composites: Multilayer Modeling and Control of the Microstructure. *J. Alloys Compounds*, 2010, vol. 505, pp. 43–53.
3. Folomeev A.I., Kol'tsov S.I. O mekhanizme vzaimodeystviya magnievyykh splavov s vodoy [On the Mechanism of the Interaction of Magnesium Alloys with Water]. *Zhurnal prikladnoy khimii* [Russian Journal of Applied Chemistry], 1989, vol. 62, no. 3, pp. 704–706.
4. Aksenov V.V., Yulkova V.M. Dinamika protsessa vosplamneniya chastitsy magniya v vodyanom pare [Dynamics of Magnesium Particle Ignition Process in Water Vapor]. *Vestnik Severnogo (Arkticheskogo) federal'nogo universiteta. Ser.: Estestvennye nauki*, 2015, no. 4, pp. 111–118.
5. Brzhustovskiy T., Glassmen I. Parofaznye diffuzionnye plamena pri gorenii magniya i alyuminiya [Vapor Phase Diffusion Flames by Combustion of Magnesium and Aluminum]. *Geterogennoe gorenie* [Heterogeneous Combustion]. Moscow, 1967, pp. 91–163.
6. Gol'dshleger U.I., Shafirovich E.Ya. Rezhimy gorenija magniya v oksidakh ugleroda. 1. Gorenie v CO₂ [Modes of Magnesium Combustion in Carbon Monoxide. 1. Combustion in CO₂]. *Fizika gorenija i vzryva* [Combustion, Explosion, and Shock Waves], 1999, vol. 35, no. 6, pp. 42–49.
7. Gol'dshleger U.I., Shafirovich E.Ya. Rezhimy gorenija magniya v oksidakh ugleroda. 2. Gorenie v CO [Modes of Magnesium Combustion in Carbon Monoxide. 2. Combustion in CO]. *Fizika gorenija i vzryva* [Combustion, Explosion, and Shock Waves], 2000, vol. 36, no. 2, pp. 67–73.

8. Gol'dshleger U.I., Amosov S.D. Rezhimy goreniya i mekhanizmy vysokotemperaturnogo okisleniya magniya v kislorode [Combustion Modes and Mechanisms of High-Temperature Oxidation of Magnesium in Oxygen]. *Fizika goreniya i vzryva* [Combustion, Explosion, and Shock Waves], 2004, vol. 40, no. 3, pp. 28–39.
9. Gurevich M.A., Stepanov A.M. Vosplamnenie metallicheskoj chastitsy [Inflammation of the Metal Particle]. *Fizika goreniya i vzryva* [Combustion, Explosion, and Shock Waves], 1968, vol. 4, no. 3, pp. 334–342.
10. Derevyaga M.E., Stesik L.N., Fedorin E.A. Rezhimy goreniya magniya [Modes of Magnesium Combustion]. *Fizika goreniya i vzryva* [Combustion, Explosion, and Shock Waves], 1978, vol. 14, no. 5, pp. 3–10.
11. Fedorov A.V., Tropin D.A. Matematicheskaya model' vosplamneniya magniya v rasshirennom diapazone parametrov [Mathematical Model of Magnesium Ignition in an Expanded Range of Options]. *Fizika goreniya i vzryva* [Combustion, Explosion, and Shock Waves], 2008, vol. 44, no. 5, pp. 64–71.
12. Fedorov A.V., Shul'gin A.V. Modelirovanie goreniya chastitsy magniya [Modeling of Magnesium Particle Combustion]. *Fizika goreniya i vzryva* [Combustion, Explosion, and Shock Waves], 2009, vol. 45, no. 6, pp. 20–25.
13. Shevtsov V.I. Model' parofaznogo okisleniya chastits metallov [Model of Steam Oxidation of Metal Particles]. *Fizika goreniya i vzryva* [Combustion, Explosion, and Shock Waves], 1996, vol. 32, no. 3, pp. 95–101.
14. Cassel H.M., Liebman I. Combustion of Magnesium Particles II Ignition Temperatures and Thermal Conductivities of Ambient Atmospheres. *Combustion and Flame*, 1963, vol. 7, no. 1, pp. 79–81.
15. Yagodnikov D.A. Vosplamnenie i gorenje gazodispersnykh sistem na osnove metallicheskih goryuchikh [Ignition and Combustion of Gas-Dispersed Systems Based on Metal Combustibles]. *Zakony goreniya* [The Laws of Combustion]. Ed. by Yu.V. Polezhaev. Moscow, 2006, pp. 160–183.
16. Kubashevskiy O., Gopkins B. *Okislenie metallov i splavov* [Oxidation of Metals and Alloys]. Moscow, 1965.
17. Ezhovskiy G.K., Mochalova A.S., Ozerov E.S., Yurinov A.A. Vosplamnenie i gorenje chastitsy magniya [Ignition and Combustion of Magnesium Particles]. *Gorenje i vzryv: materialy IV Vsesoyuz. simp. po goreniyu i vzryvu* [Combustion and Explosion: Proc. 4 All-Union Symp. on Combustion and Explosion]. Moscow, 1972, pp. 234–240.
18. Frank-Kamenetskiy D.A. *Osnovy makrokinetiki. Diffuziya i teploperedacha v khimicheskoy kinetike* [Principles of Macrokinetics. Diffusion and Heat Transfer in Chemical Kinetics]. Moscow, 2008.
19. Ozerov E.S. *Osnovy teorii vosplamneniya gazodispersnykh sistem* [Fundamentals of the Theory of Ignition of Gas-Dispersed Systems]. Leningrad, 1978.
20. Vargaftik N.B., Vinogradov Yu.K., Yargin V.S. *Handbook of Physical Properties of Liquids and Gases*. New York, 1996.
21. Bretshnayder S. *Svoystva gazov i zhidkostey* [Properties of Gases and Liquids]. Moscow; Leningrad, 1966.
22. Reynor G.V. *Metallovedenie magniya i ego splavov* [Metallurgical Science of Magnesium and Its Alloys]. Moscow, 1964.
23. Kutateladze S.S. *Osnovy teorii teploobmena* [Fundamentals of Heat Transfer Theory]. Novosibirsk, 1970.

doi: 10.17238/issn2227-6572.2016.2.91

V.V. Aksekov*, V.M. Yulkova*

*Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov

THE ASSESSMENT OF CRITICAL CONDITIONS OF DISPERSED MAGNESIUM IGNITION IN WATER VAPOR

The paper investigates experimentally and analytically the ignition process of dispersed magnesium in water vapor. In the experiment under controlled conditions of temperature and consumption of the oxidant (water vapor) the critical ignition temperatures of dispersed metal (fine magnesium cutting of 0.07 mm thick) existed. Its combustion limit was determined by a sharp increase of the ignition delay time near the critical temperature. Analytically the critical kindling temperatures of magnesium in water vapor

Corresponding author: Vasilij Aksekov, *address:* Naberezhnaya Severnoy Dviny, 22, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation; *e-mail:* vasvikaks@gmail.com

were calculated on the basis of a mathematical model, according to which the dispersed magnesium was considered as an assembly of particles, uniformly distributed in the gas volume and represented a system with the volume source of heat. Their power level depended on the metal particles concentration and sizes. It was assumed that those particles were involved in the convective and radiative heat transfer with the environment in the presence of a chemical reaction of magnesium interaction with water vapor on their surface. Based on the known kinetics, determining the rate of the metal interaction with a gaseous oxidizer, the used mathematical model allowed us to make the quantitative calculations of critical kindling temperatures of the dispersed metal or macrokinetic constants by well-known experimental critical temperatures. The dispersed magnesium combustion in the water vapor is heterogenetic. If the intensity of the internal heat transfer between the dispersed magnesium and water vapor in the gas-dispersed system is much less than the intensity of the system heat exchange with the environment, the equation defining the critical conditions of ignition of dispersed magnesium in water vapor enters the equation defining the critical ignition conditions of an individual sample in the oxidizer.

Keywords: *ignition, induction time, dispersed magnesium, gaseous oxidizer.*

Received on March 11, 2016