

АКСЁНОВ Василий Викторович

Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова
адрес: 163002, г. Архангельск, наб. Северной Двины, д. 22; e-mail: vasvikaks@gmail.com

ЮЛКОВА Виктория Михайловна

Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова
адрес: 163002, г. Архангельск, наб. Северной Двины, д. 22; e-mail: v.ulkova@narfu.ru

**ДИНАМИКА ПРОЦЕССА ВОСПЛАМЕНЕНИЯ ЧАСТИЦЫ МАГНИЯ
В ВОДЯНОМ ПАРЕ**

В рамках реализации программы получения и преобразования водорода в режимах горения осуществлено исследование динамики процесса воспламенения твердого магния в водяном паре методом термографирования разогреваемого и воспламеняющегося образца. Установлено, что на начальном участке термограммы скорость химической реакции взаимодействия магния с водяным паром была невелика, и частица металла прогревалась от начальной температуры до температуры окружающей среды в основном за счет конвективного и радиационного теплообмена с газовым потоком и стенками реакционной камеры. В дальнейшем магний продолжал нагреваться за счет тепловыделения в химической реакции с водяным паром и отдавать энергию в окружающую среду. Затем наблюдался резкий рост температуры металла, и образец воспламенялся. Воспламенение магния всегда происходило при температуре, которая была ниже температуры плавления металла, что указывало на гетерогенный характер процесса предпламенного окисления и воспламенения твердого магния в водяном паре. При обработке экспериментальных данных использовалась математическая модель процесса воспламенения твердого магния, которая учитывала конвективный и радиационный теплообмен частицы металла с окружающей средой, наличие теплоотвода по термпаре и тепловыделение в гетерогенной химической реакции взаимодействия металла с газообразным окислителем (водяным паром). Численный расчет по этой модели позволил уточнить кинетические параметры, определяющие характер взаимодействия твердого магния с водяным паром, рассчитать время индукции и критические температуры воспламенения магния в водяном паре и в парогазовых смесях. Показано, что в пределах точности расчета и погрешности эксперимента наблюдалась близость и соответствие расчетных и экспериментальных критических температур и задержек воспламенения для всей совокупности экспериментальных данных.

Ключевые слова: динамика воспламенения, время индукции, металл, газообразный окислитель.

Научный интерес к процессам воспламенения газодисперсных систем обусловлен потребностями практики, которые возникают при

реализации процессов технологического горения [1–4], используемых для промышленного синтеза веществ и материалов, в т. ч. в рамках

реализации программы получения и преобразования водорода в режимах горения.

Известно [5], что водород может быть получен в результате процесса низкотемпературного окисления магниевых сплавов в воде. Однако, на наш взгляд, более перспективным является получение водорода в реакции взаимодействия магния с водяным паром, протекающей в режиме горения, т. к. в таком режиме скорость этой реакции возрастает на несколько порядков.

Для реализации процесса горения необходимо исследовать режимы предпламенного окисления и воспламенения магния в водяном паре. Поэтому решение этой задачи представляется актуальным.

Основное внимание в известной нам литературе [6–16] уделялось экспериментальному и теоретическому исследованию воспламенения и горения магния в кислороде, азоте, водороде и оксидах углерода. Воспламенение и горение магния в водяном паре изучено в меньшей степени.

В частности, в [17] установлен линейный закон окисления магния в диапазоне давлений водяного пара 31–208 мм рт. ст. в интервале температур 423–500 °С, а при более высоких давлениях представлена лишь качественная картина этого процесса в интервале температур 500–575 °С.

В [18] 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. При этом динамика процесса разогрева и воспламенения металла в водяном паре не исследовалась. Однако, на наш взгляд, практический интерес представляет изучение именно этого процесса, позволяющего близко моделировать условия предпламенного окисления и воспламенения металла в газообразном окислителе. Поэтому в данной работе процесс воспламенения магния в водяном паре исследовался нами с использованием метода термографирования нагреваемого и воспламеняющегося образца.

Материалы и методы. Эксперименты проводились в реакционной камере – вертикаль-

ной трубке из нержавеющей стали диаметром 20 мм и длиной 200 мм, через которую по обогреваемой магистрали продувался водяной пар или смесь пара с аргоном или азотом.

Контроль за расходом газа осуществлялся с помощью реометров. Температуры газа и стенки реакционной камеры регулировались независимо с помощью секционных нагревателей, что позволяло поддерживать необходимый температурный режим на измерительном участке с требуемой точностью.

В центр модельного образца (тонкой магниевой пластинки размером 10×6,0×2,0 мм) зачеканивалась хромель-алюмелевая термопара, сигнал с которой поступал на осциллограф, с помощью которого производилось снятие кривой разогрева (термограммы образца) и определялся момент воспламенения металла.

Температура газа контролировалась термопарой, спай которой находился несколько ниже образца, а температура стенки – термопарой, зачеканенной в стенку камеры.

Перед экспериментом образец, подвешенный на термопаре, находился в цилиндрической предкамере, установленной над реакционной камерой, продуваемой инертным газом и отделенной от реакционной камеры задвижкой, что практически исключало контакт металла с окислителем до опыта.

После достижения требуемого температурного режима образец быстро вводился в реакционную камеру. Для этого открывалась задвижка, и образец вместе с термопарой после освобождения от специального фиксатора падал вниз и устанавливался в центральной части камеры. От момента ввода в реакционную камеру до момента воспламенения непрерывно производилась запись температуры T_s образца (частицы металла) от времени t (рис. 1).

Результаты и обсуждение. Анализ показывает, что на начальном участке термограммы частица металла прогревается до температуры окружающей среды (соответствует моменту времени, равному 40 с на рис. 1) в основном за счет конвективного и радиационного теплообмена с газовым потоком и стенками реак-

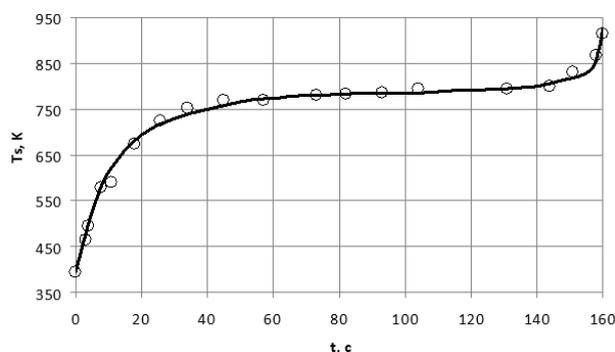


Рис. 1. Зависимость температуры T_s частицы металла от времени t : сплошная линия – расчетные данные, кружки – экспериментальные точки

ционной камеры. Это обусловлено тем, что на данном участке скорость химической реакции взаимодействия магния с водяным паром относительно невелика, и влияние тепловыделения за счет химической реакции на тепловой баланс образца не является здесь определяющим.

В дальнейшем, после того как температура частицы превысит температуру окружающей среды, образец продолжает нагреваться за счет тепловыделения в химической реакции взаимодействия магния с водяным паром и отдает энергию в окружающую среду (соответствует интервалу времени от 40 до 140 с на рис. 1). Затем наблюдается резкий рост температуры металла и образец воспламеняется.

Вспышку можно было зафиксировать и визуально, установив образец против смотрового окна в стенке реакционной камеры.

Эксперименты проводились в среде чистого пара и в пароаргонных и парозотных смесях при атмосферном давлении в интервале температур 750–860 К. Массовая концентрация окислителя изменялась в зависимости от соотношения расходов пара, аргона и азота от 6,0 до 100 %, скорость парогазовой смеси – от 1,5 до 8,0 м/с.

При обработке термограмм учитывался конвективный и радиационный теплообмен частицы металла с окружающей средой и наличие теплоотвода по термпаре (державке), которая

по аналогии с [19, 20] рассматривалась как полубесконечный тонкий стержень, торец которого имел температуру образца в предположении, что поле температур в державке безынерционно следовало за изменением температуры образца. Пространственной неоднородностью поля температур пренебрегали (число $Bi \ll 1$). Считали несущественным испарение и выгорание металла за индукционный период.

В этих приближениях уравнение теплового баланса образца имело следующий вид:

$$m_M c_M \frac{dT_s}{dt} = qsk_* (\rho n)^v \exp(-E / RT_s) - \frac{Nu\lambda}{L} (T_s - T_e) s - \varepsilon \sigma s (T_s^4 - T_w^4) - \left(\frac{Nu_* u_* f_* \lambda_* \lambda}{L_*} \right)^{0.5} (T_s - T_e) \quad (1)$$

$t = 0: T_s = T_{s0}.$

В этом уравнении m_M , c_M , s – соответственно масса, удельная теплоемкость и площадь поверхности образца, q – тепловой эффект реакции на единицу массы окислителя, R – универсальная газовая постоянная, E – энергия активации, T_s , T_e , T_w , T_{s0} – соответственно температуры образца, окружающей среды, стенки реакционной камеры и начальная температура образца, t – время, Nu , L – число Нуссельта и характерный размер образца, λ , ρ – коэффициент теплопроводности и плотность газа, n – массовая концентрация окислителя (водяного пара), v – порядок реакции по окислителю, ε – степень черноты поверхности металла, σ – постоянная Стефана–Больцмана, Nu_* , u_* , f_* , λ_* , L_* – соответственно число Нуссельта, периметр, площадь поперечного сечения, коэффициент теплопроводности и характерный размер державки (термопары).

Численное решение уравнения теплового баланса (1) с привлечением полученных из эксперимента термограмм нагревающегося и воспламеняющегося образца позволяет найти эффективные коэффициенты теплообмена, используя начальный участок термограммы. На этом участке прогрев образца определяется интенсивностью конвективного и радиационного теплообмена частицы металла с окружа-

ющей средой, т. к. влияние тепловыделения в химической реакции на тепловой баланс образца на этом участке оказалось незначительным.

Искомые (в первом приближении) считались коэффициенты теплообмена, отвечающие минимальному отклонению расчетных и экспериментальных температур на начальном участке термограммы в пределах погрешности эксперимента.

При более высоких температурах характер зависимости температуры образца от времени определяется соотношением теплопотерь в окружающую среду и тепловыделения в химической реакции. Поэтому на данном участке находились кинетические константы (предэкспонент, энергия активации, порядок реакции) с учетом ранее найденных эффективных коэффициентов теплообмена. Расчет заканчивался при достижении минимального отклонения экспериментальных и расчетных температур, полученного для всей кривой разогревающегося и воспламеняющегося образца.

При проведении расчетов начальные приближения для эффективных коэффициентов теплообмена принимались по рекомендациям [21], а теплофизические свойства парогазовых смесей и металла рассчитывались с использованием [22–24].

В результате обработки термограмм по описанной выше методике были получены кинетические константы, определяющие характер предпламенного окисления твердого магния в водяном паре: $E/R = 20,4 \cdot 10^3$ К, $k_a = 10^8$ кг^{1/2}/(м^{1/2}с), $\nu = 0,50$, с помощью них были рассчитаны критические температуры воспламенения магниевых образцов в водяном паре, а также в пароаргонных и парозотных смесях, для нахождения которых уравнение (1) по аналогии с [19, 20] преобразовалось к виду

$$\frac{d\theta_s}{d\tau} = \chi \exp(\theta_s) - (1 + k_r)\theta_s, \quad \tau = 0: \theta_s = \theta_{s0}. \quad (2)$$

Здесь

$$\theta_s = \frac{E}{R(T^*)^2}(T_s - T^*); \quad \tau = \frac{\text{Nu}\lambda s(1 + k_c)}{m_M c_M L} t;$$

$$k_c = \left(\frac{\text{Nu}_* u_* f_* L^2}{L_* \text{Nu}^2 \lambda s^2} \right)^{0,5}; \quad \chi = \frac{q k_* (\rho n)^v L E \exp(-E / RT^*)}{\text{Nu}\lambda(1 + k_c)R(T^*)^2};$$

$$T^* = T_e \left[1 - \frac{(1 - a)k_r}{4(1 + k_r)} \right]; \quad a = \left(\frac{T_w}{T_e} \right)^4; \quad k_r = \frac{4L\varepsilon\sigma T_e^3}{\text{Nu}\lambda(1 + k_c)}.$$

Связь между параметрами на пределе воспламенения находилась из уравнения (2) с использованием условий теплового взрыва по Семенову, Зельдовичу, Франк-Каменецкому [1, 25, 26]:

$$\frac{\chi}{1 + k_r} = \frac{1}{e}. \quad (3)$$

Критические температуры воспламенения были получены нами расчетным путем с точностью $\pm 0,5$ К в результате численного решения уравнения (1), а также уравнения (3).

В пределах точности расчета и погрешности эксперимента наблюдается близость и соответствие расчетных и экспериментальных критических температур воспламенения для всей совокупности экспериментальных данных. Например, в пароаргонной смеси при массовой концентрации окислителя 10 % и скорости газового потока 7,0 м/с экспериментальное значение критической температуры воспламенения составило 772 ± 2 К, а расчетные значения этой температуры, полученные в результате численного решения уравнений (1) и (3), соответственно $774 \pm 0,5$ К и $773 \pm 0,5$ К. Расчетное значение критической температуры воспламенения для этого режима, полученное с помощью [18], оказалось значительно выше и составило 872 К. Поэтому можно полагать, что исследование динамики процесса воспламенения металла в газообразном окислителе позволяет получать более точную и детальную информацию, чем использование для этой цели только критических температур воспламенения.

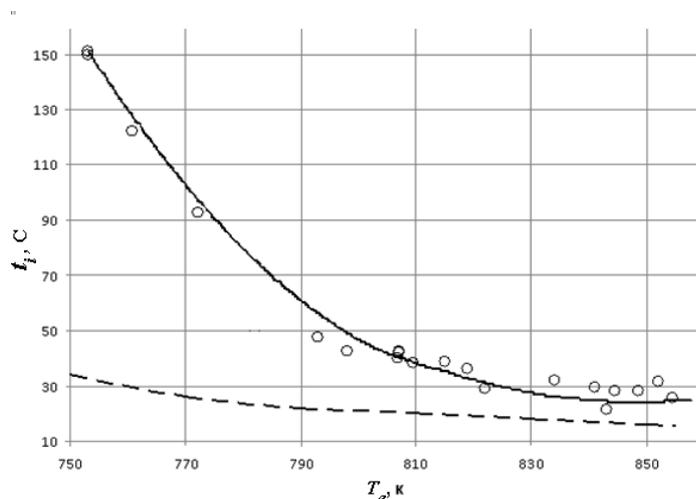


Рис. 2. Зависимость времени индукции t_i магниевых образцов от температуры окружающей среды T_e : сплошная линия – расчет по уравнению (1), пунктирная линия – расчет по модели парофазного окисления, кружки – экспериментальные точки

На *рис. 2* представлены зависимости времени индукции (задержки воспламенения) t_i магниевых образцов от температуры окружающей среды T_e . Верхняя кривая получена с использованием найденных в нашей работе кинетических констант. Расчет этой зависимости производился при условии, что температура окружающей образец среды T_e равна температуре T_w стенок реакционной камеры. В этом приближении, как следует из *рис. 2*, наблюдается удовлетворительное соответствие экспериментальных и расчетных задержек воспламенения твердого магния в водяном паре. Нижняя кривая на *рис. 2* получена с использованием модели парофазного окисления щелоч-

ноземельных металлов [14]. Как показывает анализ, использование этой модели приводит к сильному отклонению расчетных величин от экспериментальных как по задержкам, так и по пределам воспламенения частиц магния в водяном паре.

Заключение. Таким образом, исследование динамики процесса воспламенения частицы металла в газообразном окислителе указывает на гетерогенный характер взаимодействия твердого магния с водяным паром и позволяет более точно установить кинетические параметры, определяющие характер предпламенного окисления и воспламенения металла в газообразном окислителе.

Список литературы

1. *Рогачов А.С., Мукасян А.С.* Горение для синтеза материалов: введение в структурную макрокинетику. М., 2013. 400 с.
2. *Рогачов А.С., Мукасян А.С.* Экспериментальная проверка дискретных моделей горения микрогетерогенных составов, образующих конденсированные продукты сгорания // *Физика горения и взрыва*. 2015. Т. 51, № 1. С. 66–76.

3. *Baras F., Kondepudi D.K.* A Multilayer Model for Self-Propagating High-Temperature Synthesis of Intermetallic Compounds // *J. Phys. Chem. B.* 2007. V. 111. P. 6457–6468.
4. *Khina B.B., Formanek B.* On Applicability of the Kinetics of Diffusion-controlled Interaction to SHS Modeling // *Heat Transf. Res.* 2007. V. 38, № 3. P. 197–209.
5. *Фоломеев А.И., Кольцов С.И.* О механизме взаимодействия магниевых сплавов с водой // *Журн. приклад. химии.* 1989. Т. 62, № 3. С. 704–706.
6. *Бржустовский Т., Глассмен И.* Парофазные диффузионные пламена при горении магния и алюминия // *Гетерогенное горение.* М., 1967. С. 91–163.
7. *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.
8. *Гольдшлегер У.И., Шафирович Е.Я.* Режимы горения магния в оксидах углерода. 2. Горение в CO // *Физика горения и взрыва.* 2000. Т. 36, № 2. С. 67–73.
9. *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.
10. *Гуревич М.А., Степанов А.М.* Воспламенение металлической частицы // *Физика горения и взрыва.* 1968. Т. 4, № 3. С. 334–342.
11. *Деревяга М.Е., Стесик Л.Н., Федорин Э.А.* Режимы горения магния // *Физика горения и взрыва.* 1978. Т. 14, № 5. С. 3–10.
12. *Фёдоров А.В., Тропин Д.А.* Математическая модель воспламенения магния в расширенном диапазоне параметров // *Физика горения и взрыва.* 2008. Т. 44, № 5. С. 64–71.
13. *Фёдоров А.В., Шульгин А.В.* Моделирование горения частицы магния // *Физика горения и взрыва.* 2009. Т. 45, № 6. С. 20–25.
14. *Шевцов В.И.* Модель парофазного окисления частиц металлов // *Физика горения и взрыва.* 1996. Т. 32, № 3. С. 95–101.
15. *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.
16. *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.
17. *Кубашевский О., Гопкинс Б.* Окисление металлов и сплавов. М., 1965.
18. *Ежовский Г.К., Мочалова А.С., Озеров Е.С., Юринов А.А.* Воспламенение и горение частицы магния // *Горение и взрыв: материалы IV Всесоюз. симпозиума по горению и взрыву.* М., 1972. С. 234–240.
19. *Аксёнов В.В.* Использование метода малых возмущений для определения критических условий воспламенения металла в газообразном окислителе // *Наука – Северному региону: сб. науч. тр. Архангельск,* 2006. Вып. 67. С. 8–13.
20. *Аксёнов В.В.* Влияние концентрации окислителя на критические условия воспламенения твердого магния в водяном паре // *Проблемы теплоэнергетики Европейского Севера: сб. науч. тр. Архангельск,* 2010. С. 25–32.
21. *Кутателадзе С.С.* Основы теории теплообмена. Новосибирск, 1970. 416 с.
22. *Vargaftik N.B., Vinogradov Yu.K., Yargin V.S.* Handbook of Physical Properties of Liquids and Gases. N.Y., 1996. 1359 с.
23. *Бретинайдер С.* Свойства газов и жидкостей. М.; Л., 1966. 535 с.
24. *Рейнор Г.В.* Металловедение магния и его сплавов. М., 1964.
25. *Зельдович Я.Б., Баренблатт Г.И., Либрович В.Б.* Математическая теория горения и взрыва. М., 1980. 478 с.
26. *Франк-Каменецкий Д.А.* Диффузия и теплопередача в химической кинетике. М., 1987. 500 с.

References

1. Rogachov A.S., Mukas'yan A.S. *Gorenie dlya sinteza materialov: vvedenie v strukturnuyu makrokinetiku* [Combustion for the Synthesis of Materials: Introduction to Structural Macrokinetics]. Moscow, 2013. 400 p.
2. Rogachov A.S., Mukas'yan A.S. Eksperimental'naya proverka diskretnykh modeley goreniya mikrogeterogennykh sostavov, obrazuyushchikh kondensirovannye produkty sgoraniya [Experimental Verification of Discrete Combustion Models of Micro-Heterogeneous Compositions Forming the Condensed Combustion Products]. *Fizika goreniya i vzryva* [Combustion, Explosion, and Shock Waves], 2015, vol. 51, no. 1, pp. 66–76.

3. Baras F., Kondepudi D.K. A Multilayer Model for Self-Propagating High-Temperature Synthesis of Intermetallic Compounds. *J. Phys. Chem. B.*, 2007, vol. 111, pp. 6457–6468.
4. Khina B.B., Formanek B. On Applicability of the Kinetics of Diffusion-Controlled Interaction to SHS Modeling. *Heat Transf. Res.*, 2007, vol. 38, no. 3, pp. 197–209.
5. Folomeev A.I., Kol'tsov S.I. O mekhanizme vzaimodeystviya magnievyykh splavov s vodoy [On the Mechanism of the Interaction of Water with Magnesium Alloys]. *Zhurnal prikladnoy khimii* [Russian Journal of Applied Chemistry], 1989, vol. 62, no. 3, pp. 704–706.
6. Brzhustovskiy T., Glassmen I. Parofaznye diffuzionnye plamena pri gorenii magniya i alyuminiya [Vapor Phase Diffusion Flames by Magnesium and Aluminum Combustion]. *Geterogennoe gorenie* [Heterogeneous Combustion]. Moscow, 1967, pp. 91–163.
7. Gol'dshleger U.I., Shafirovich E.Ya. Rezhimy gorenija magniya v oksidakh ugleroda. 1. Gorenje 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.
8. Gol'dshleger U.I., Shafirovich E.Ya. Rezhimy gorenija magniya v oksidakh ugleroda. 2. Gorenje 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.
9. Gol'dshleger U.I., Amosov S.D. Rezhimy gorenija i mekhanizmy vysokotemperaturnogo okislenija magniya v kislorode [Combustion Regime and Mechanisms of High-Temperature Oxidation of Magnesium in Oxygen]. *Fizika gorenija i vzryva* [Combustion, Explosion, and Shock Waves], 2004, vol. 40, no. 3, pp. 28–39.
10. Gurevich M.A., Stepanov A.M. Vosplamnenie metallicheskoj chastitsy [Ignition of the Metal Particles]. *Fizika gorenija i vzryva* [Combustion, Explosion, and Shock Waves], 1968, vol. 4, no. 3, pp. 334–342.
11. Derevyaga M.E., Stesik L.N., Fedorin E.A. Rezhimy gorenija magniya [Modes of Magnesium Combustion]. *Fizika gorenija i vzryva* [Combustion, Explosion, and Shock Waves], 1978, vol. 14, no. 5, pp. 3–10.
12. Fedorov A.V., Tropin D.A. Matematicheskaya model' vosplamnenija magniya v rasshirennom diapazone parametrov [A Mathematical Model of Magnesium Ignition in an Expanded Range of Parameters]. *Fizika gorenija i vzryva* [Combustion, Explosion, and Shock Waves], 2008, vol. 44, no. 5, pp. 64–71.
13. Fedorov A.V., Shul'gin A.V. Modelirovanie gorenija chastitsy magniya [Combustion Modeling of a Magnesium Particle]. *Fizika gorenija i vzryva* [Combustion, Explosion, and Shock Waves], 2009, vol. 45, no. 6, pp. 20–25.
14. Shevtsov V.I. Model' parofaznogo okislenija chastitsy metallov [Model of Steam Oxidation of Metal Particles]. *Fizika gorenija i vzryva* [Combustion, Explosion, and Shock Waves], 1996, vol. 32, no. 3, pp. 95–101.
15. 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.
16. Yagodnikov D.A. Vosplamnenie i gorenje gazodispersnykh sistem na osnove metallicheskikh goryuchikh [Ignition and Combustion of the Gas-Dispersed Systems Based on Metal Fuel]. *Zakony gorenija* [Burning Laws]. Ed. by Yu.V. Polezhaev. Moscow, 2006, pp. 160–183.
17. Kubashevskiy O., Hopkins B. *Okislenie metallov i splavov* [Oxidation of Metals and Alloys]. Moscow, 1965.
18. Ezhovskiy G.K., Mochalova A.S., Ozerov E.S., Yurinov A.A. Vosplamnenie i gorenje chastitsy magniya [Ignition and Combustion of the Magnesium Particles]. *Gorenje i vzryv: materialy IV Vsesoyuz. simpoziuma po goreniju i vzryvu* [Combustion and Explosion: Proc. IV All-Union Symp. on Combustion and Explosion]. Moscow, 1972, pp. 234–240.
19. Aksenov V.V. Ispol'zovanie metoda малыkh vozmushcheniy dlya opredeleniya kriticheskikh usloviy vosplamnenija metalla v gazoobraznom okislitele [Using the Perturbation Theory for the Determination of Critical Conditions of Metal Ignition in the Gaseous Oxidizer]. *Nauka – Severnomu regionu: sb. nauch. tr.* [Science to the Northern Region: Proc.]. Arkhangel'sk, 2006, vol. 67, pp. 8–13.
20. Aksenov V.V. Vliyanie kontsentratsii okislitelya na kriticheskie usloviya vosplamnenija tverdogo magniya v vodyanom pare [Influence of the Oxidizing Agent Concentration on the Critical Conditions of Ignition of the Solid Magnesium in Water Vapor]. *Problemy teploenergetiki Evropeyskogo Severa: sb. nauch. tr.* [Problems of the Heat Power Industry in the European North: Proc.]. Arkhangel'sk, 2010, pp. 25–32.
21. Kutateladze S.S. *Osnovy teorii teploobmena* [Fundamentals of the Heat Transfer Theory]. Novosibirsk, 1970. 416 p.

22. Vargaftik N.B., Vinogradov Yu.K., Yargin V.S. Handbook of Physical Properties of LIQUIDS and Gases. New York, 1996.
23. Bretshnayder S. *Svoystva gazov i zhidkostey* [Properties of Gases and Liquids]. Moscow; Leningrad, 1966. 535 p.
24. Raynor G.V. *The Physical Metallurgy of Magnesium and Its Alloys*. New York, 1959.
25. Zel'dovich Ya.B., Barenblatt G.I., Librovich V.B. *Matematicheskaya teoriya goreniya i vzryva* [Mathematical Theory of Combustion and Explosion]. Moscow, 1980. 478 p.
26. Frank-Kamenetskiy D.A. *Diffuziya i teploperedacha v khimicheskoy kinetike* [Diffusion and Heat Transfer in Chemical Kinetics]. Moscow, 1987. 500 p.

doi: 10.17238/issn2227-6572.2015.4.100

Aksenov Vasilij Viktorovich

Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov
Naberezhnaya Severnoy Dviny, 22, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation;
e-mail: vasvikaks@gmail.com

Yulkova Viktoriya Mikhaylovna

Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov
Naberezhnaya Severnoy Dviny, 22, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation;
e-mail: v.yulkova@narfu.ru

DYNAMICS OF THE IGNITION PROCESS OF A MAGNESIUM PARTICLE IN WATER VAPOR

The study of the dynamics of the ignition process of solid magnesium in water vapor by the thermal mapping method of a fervescent and flammable sample in the framework of the program of hydrogen preparation and conversion in the combustion modes is carried out. The chemical rate of magnesium and water vapor interaction in the initial part of the thermogram was low, and a metal particle was heated from an initial temperature to the ambient temperature mainly due to the convective and radiative heat exchange with the gas flow and the walls of the reaction chamber. In future, the magnesium continued to heat due to the heat release in a chemical reaction with water vapor and to give energy into the environment. Then there was a sharp increase in the metal temperature, and the sample was ignited. The magnesium ignition always occurred at a temperature below the metal-melting temperature. That fact indicated the heterogeneous nature of the preflame oxidation process and solid magnesium ignition in the water vapor. A mathematical model of the ignition process of solid magnesium was used at the experimental data processing. The model took into account the convective and radiative metal particle heat transfer with the environment, the presence of a thermocouple heat sink and the heat release in a heterogeneous chemical reaction of the metal and a gaseous oxidizer (water vapor) interaction. The numerical calculation by this model allowed us to clarify the kinetic parameters determining the interaction nature of solid magnesium with water vapor, to calculate the induction time and the critical ignition temperatures of magnesium in water vapor and vapor-gas mixtures. Within the accuracy of the calculation and the experimental error the affinity and the agreement between the calculated and experimental critical temperatures and ignition delay for the entire set of the experimental data were observed.

Keywords: *dynamics of ignition, induction time, metal, gaseous oxidizer.*