

УДК 541.126

НОВЫЙ ПОДХОД К ОПРЕДЕЛЕНИЮ КИНЕТИЧЕСКОГО КОЭФФИЦИЕНТА ТРЕНИЯ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ

С.-Б. Цзян, С. Го, М. Яо, Цз.-Х. Пэн

Нанкинский научно-технологический университет, 210094 Нанкин, Китай, varshelf@gmail.com

Предложен новый подход к определению кинетического коэффициента трения взрывчатых веществ. Метод объединяет физическую модель с теоретическим анализом и численными расчетами. Измерения кинетического коэффициента трения стали показывать, что предлагаемый метод дает надежные и достоверные данные. Определен кинетический коэффициент трения между гексогеном и сталью.

Ключевые слова: кинетический коэффициент трения, порошковое ВВ, численное моделирование, гексоген.

ВВЕДЕНИЕ

Трение — часто наблюдаемое в природе явление. Его воздействие разнообразно. Например, из-за трения могут случайно взрываться взрывчатые вещества (ВВ). Трение между зарядом и гильзой, как было установлено при исследовании проникновения снарядов в бетон [1, 2], вызывает взрыв снаряда раньше, чем это необходимо. В производственных процессах [3–5] трение между оборудованием и ВВ может привести к аварии. При хранении ВВ трение способствует их инициированию. Поэтому количественные исследования и методики точного контроля трения важны для обеспечения условий безопасности.

Первый шаг в таком исследовании — это определение мощности силы трения. Выражения для ее вычисления известны. Одним из наиболее важных параметров в них является кинетический коэффициент трения (далее просто «коэффициент трения», если не оговорено другое). В настоящее время для его определения используют такие экспериментальные методы, как метод составного стержня Гопкинсона, метод определения коэффициента трения под давлением при ударе пластиной со сдвигом, динамометр Kistler и др. В работе [6] методом стержня Гопкинсона был исследован коэффициент трения между инструментальной сталью и алюминием. Результаты показали, что коэффициент трения увеличивается с ростом

шероховатости поверхности. В то же время существенное изменение скорости скольжения на границе раздела приводило лишь к небольшому изменению коэффициента трения. В работах [7–9] методом стержня Гопкинсона были определены коэффициенты трения стали, алюминия, титана и латуни. Экспериментальные результаты показали, что этот метод позволяет точно рассчитывать квазистатический и кинетический коэффициенты трения. Однако для использования данной методики образец должен быть изготовлен в форме диска, что делает методику неприменимой для порошковых ВВ. Для определения коэффициента трения частиц в работе [10] использовали устройство с вращающейся трубой. Частицы, вращаясь, движутся по трубе, в которой установлены три фотодатчика для определения времени прохождения пути частицей; коэффициент трения рассчитывается на основе упрощенной модели динамики частиц. Этим методом были измерены коэффициенты трения частиц нитрата аммония и хлорида калия при различных скоростях вращения. Средний коэффициент трения для нитрата аммония составил $0.31 \div 0.36$, для хлорида калия — $0.44 \div 0.56$. Более достоверны значения, полученные при больших скоростях вращения. В работах [11, 12] по этой методике были определены коэффициенты трения карбоната калия и мочевины и получены сходные между собой результаты. Однако методика вращающейся трубы пригодна только для частиц размером $1 \div 10$ мм. В работе [13] для определения коэффициентов трения металлов использовался динамометр Kistler, в работах [14–16] —

© Jiang Xi-Bo, Guo Song, Yao Miao, Peng Jin-Hua, 2014.

School of Chemical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, 210094 Nanjing, P. R. China.

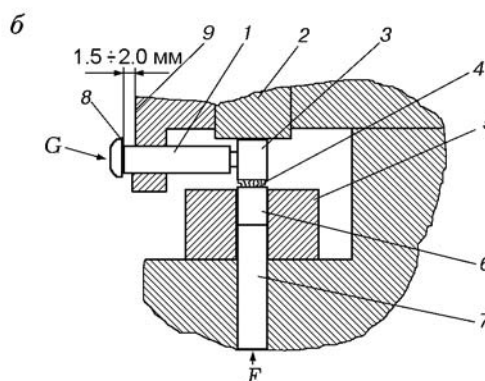
метод определения коэффициента трения под давлением при ударе пластиной со сдвигом.

Существующие методы позволяют определять коэффициент трения большинства материалов. Однако в случае порошкообразных ВВ с размером частиц порядка микро- или нанометров нельзя использовать описанные выше методы. Результаты работы [6] показали, что природа кинетических сил трения на границе контакта двух тел является сложной и на коэффициент трения влияют многие факторы. Для порошкообразных ВВ это размер частиц, их форма, плотность загрузки. К тому же из-за трения в ходе эксперимента возможно инициирование ВВ. В результате данные о коэффициенте трения порошкообразных ВВ очень ограничены. Вместе с тем они важны при производстве и использовании ВВ, поскольку дают основу для оценки риска работы с ними.

В статье развит точный и безопасный метод определения кинетического коэффициента трения ВВ, который объединяет теоретический анализ и экспериментальные измерения и позволяет рассчитать энергию, запасаемую ВВ в результате трения.

ОСНОВА ПРЕДЛОЖЕННОГО МЕТОДА

Чувствительность ВВ к трению экспериментально была определена в работах [17–20]. Основная схема экспериментального устройства приведена на рисунке. Стрелка G указывает направление движения маятника во время падения, сам маятник на рисунке не показан. Образец помещается между верхним и нижним подвижными стержнями, которые в свою очередь размещены между верхней и нижней опорами. Включается масляный насос, и к образцу прикладывается давление. Кулиса отводится на нужный угол, затем ее отпускают, и маятник бьет по ударяющему стержню 1. Этот стержень смещает верхний подвижный стержень 3 на заданное расстояние вдоль образца ВВ. При этом смещении сила трения совершает работу между стержнем 3 и образцом. Таким образом, мощность силы трения может быть выражена в терминах смещения верхнего подвижного стержня. Кроме того, она может быть представлена уравнением, включающим в себя коэффициент трения. Предлагаемый метод основан на том, что устанавливается количественная связь между смещением верхнего подвижного стержня и коэффициентом трения.



Внешний вид установки с отведенным маятником для определения коэффициента трения (а) и схема измерительного узла (б):

1 — ударяющий стержень, 2 — верхняя стойка, 3 — верхний подвижный стержень, 4 — образец ВВ, 5 — втулка, 6 — нижний подвижный стержень, 7 — нижняя поддерживающая стойка, 8 — боковая поверхность ударяющего стержня, 9 — стенка аппарата, G — направление движения маятника, F — направление действия давления

Зазор между стенкой аппарата и стержнем 3 измеряется до и после падения маятника. Разница между этими значениями соответствует действительному смещению стержня 3 в ходе эксперимента.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ МЕТОДА

При расчете коэффициента трения сопротивление воздуха и сила трения в узле вращения маятника не учитываются. Распределение образца порошкового ВВ на поверхности нижнего подвижного стержня симметрично, и давление нагрузки равномерно распределено по поверхности образца. Считается, что удар маятника по стержню 1 абсолютно неупругий и после соударения маятник движется горизон-

тально, без рикошета. Упругим сжатием в теле маятника (включая сам маятник и кулису), в ударяющем стержне и верхнем подвижном стержне пренебрегается.

Весь процесс может быть разделен на следующие стадии. Первая — падение маятника до его соударения со стержнем 1, вторая — движение маятника и ударяющего стержня вместе, в то время как скорость верхнего подвижного стержня 3 постепенно меняется и в конце концов работа силы трения приводит к остановке всех подвижных частей. Математическая модель, описывающая эти стадии, может быть представлена уравнениями:

$$M_b g l_b \sin \theta = -I \frac{d^2 \theta}{dt^2},$$

$$f = \mu(p + mg), \quad (1)$$

$$df = \frac{\mu(p + mg)}{\pi R^2} ds;$$

$$E_k = \frac{1}{2} M_b v^2,$$

$$M_b v = (m_p + m + M_b) v', \quad (2)$$

$$E'_k = \frac{1}{2} (m_p + m + M_b) v_t'^2.$$

Здесь p — давление, МПа; θ — угол отклонения маятника; μ — кинетический коэффициент трения между ВВ и сталью; m — масса подвижного стержня, кг; R — радиус подвижного стержня, м; m_p — масса ударяющего стержня, кг; M_b — масса тела маятника, кг; l_b — расстояние между центром тяжести и центром вращения, м; I — момент инерции маятника (вместе с кулисой), кг · м²; E_k — кинетическая энергия маятника (вместе с кулисой) перед ударом, Дж; E'_k — энергия верхнего подвижного стержня и ударяющего стержня после удара, Дж; μ_s — кинетический коэффициент трения между верхней опорой и верхним подвижным стержнем.

На основе уравнения (1) можно рассчитать мощность силы трения W_t в зависимости от смещения s между образцом и верхним подвижным стержнем:

$$W_t = \frac{\mu(p + mg)}{\pi R^2} \left[\left(\frac{\pi}{2} + 2 \right) R^2 s + \left(\frac{\pi}{2} - \frac{5}{3} \right) R^3 - s^2 R \right] - \mu_s p s. \quad (3)$$

Подставляя уравнение (3) в (2) и используя уравнение

$$\frac{ds}{dt} = \left\{ \frac{2M_b^2 g l_b (1 - \cos \theta)}{(m_p + m + M_b)^2} - \frac{2\mu(p + mg)}{\pi R^2 (m_p + m + M_b)} \right\} \times \left[\left(\frac{\pi}{2} + 2 \right) R^2 s + \left(\frac{\pi}{2} - \frac{5}{3} \right) R^3 - s^2 R \right] - \frac{2\mu_s p s}{m_p + m + M_b} \Bigg\}^{1/2}, \quad (4)$$

можно вычислить смещение s в любой момент времени. Уравнение (4) устанавливает связь между смещением верхнего подвижного стержня s и кинетическим коэффициентом трения μ .

Масса маятника и параметры тестирующей аппаратуры известны. Если смещение верхнего подвижного стержня измерено, то при постоянном коэффициенте трения данная проблема решена. Для решения уравнения (4) использован улучшенный метод Эйлера. Расчет проводился по программе MATLAB при заданных значениях θ , p , известных параметрах тестирующей аппаратуры и прогностическом значении μ . Результат вычисления смещения сравнивался с экспериментальным. Если они не совпадали, значение μ уточнялось и расчет проводился вновь до тех пор, пока оба значения не становились одинаковыми.

ВЕРИФИКАЦИЯ МЕТОДА

Метод тестировали путем определения коэффициента трения между верхним и нижним подвижными стержнями, сделанными из одной и той же марки стали. Метод можно использовать, если полученное значение коэффициента трения совпадает с уже известным из литературы.

В ходе тестирования задавали три значения угла отклонения маятника и два значения давления нагрузки. При одинаковых условиях выполнено по 10 опытов (табл. 1). Смещение верхнего подвижного стержня стабильно, отклонение не превосходит 0.1 мм. Для расчета коэффициента трения использовали среднее по 10 опытам значение смещения. В табл. 2 представлены средние экспериментальные и расчетные значения смещения верхнего подвижного стержня, а также соответствующие значения коэффициента трения стали. Из табл. 2 видно, что при данных условиях кинетический

Таблица 1

Смещение верхнего подвижного стального стержня при различных условиях

Условия эксперимента	Смещение, мм, в серии из 10 опытов									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\alpha = 50^\circ, p = 3.92$ МПа	0.6	0.6	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.6	0.6	0.6
$\alpha = 50^\circ, p = 4.9$ МПа	0.5	0.5	0.4	0.5	0.4	0.4	0.5	0.5	0.4	0.5
$\alpha = 70^\circ, p = 3.92$ МПа	1.2	1.2	1.3	1.2	1.2	1.3	1.3	1.2	1.3	1.2
$\alpha = 70^\circ, p = 4.9$ МПа	0.9	1.0	1.0	1.0	0.9	1.0	0.9	0.9	0.9	1.0
$\alpha = 80^\circ, p = 4.9$ МПа	1.4	1.3	1.4	1.3	1.3	1.3	1.4	1.3	1.4	1.3

Таблица 2

Кинетический коэффициент трения между стальными верхним и нижним подвижными стержнями при различных условиях

Угол отклонения, град	Давление на датчике, МПа	Смещение верхнего подвижного стержня, мм		Кинетический коэффициент трения между стержнями
		среднее	расчетное	
50	3.92	0.55	0.56	0.15
50	4.9	0.45	0.46	0.14
70	3.92	1.2	1.20	0.13
70	4.9	0.9	0.93	0.13
80	4.9	1.3	1.30	0.12

коэффициент трения между верхним и нижним стальными подвижными стержнями лежит в диапазоне $0.12 \div 0.15$. Он изменяется в зависимости от угла отклонения маятника и давления нагрузки. При одном и том же угле отклонения коэффициент трения уменьшается при увеличении давления. Например, при угле 50° уменьшение составляет 0.01 при повышении давления от 3.92 до 4.9 МПа. С ростом угла отклонения коэффициент трения имеет тенденцию к уменьшению. Например, при давлении 4.9 МПа он уменьшается на 0.03 при увеличении угла от 50° до 80° .

Авторы работы [21] установили, что без использования смазки коэффициент трения равен примерно 0.15. Результаты экспериментов показывают, что коэффициент трения уменьшается с ростом давления и относительной скорости движения двух трущихся поверхностей. В соответствии с этим увеличение угла отклонения означает рост скорости движения этих поверхностей. Все это дает основание считать предложенный метод достоверным и результативным. При дальнейшем его улучшении он может быть использован для определения ко-

эффициента трения ВВ.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ И РАСЧЕТНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Гексоген наиболее часто используется в военных приложениях. Поэтому в данной работе он (порошкообразный) выбран для определения коэффициента трения между ним и сталью. Размер частиц гексогена $180 \div 250$ мкм. Масса образца около 20 мг. Образец наносили на нижний подвижный стержень, и при вращении втулки он равномерно распределялся по нему. Смещение верхнего подвижного стержня определяли при различных условиях: 4.9 МПа и 50° ; 3.5 МПа и 50° ; 2.5 МПа и 40° . При одинаковых условиях проводили по 10 опытов, результаты которых представлены в табл. 3. Во всех проведенных экспериментах гексоген не реагировал.

Результаты, приведенные в табл. 3, показывают заметный разброс смещения s при одних и тех же условиях экспериментов. Так, например, при 4.9 МПа и 50° смещение варьирует в диапазоне $0.6 \div 0.9$ мм. При таком боль-

Таблица 3

Смещение верхнего подвижного стального стержня в опытах с образцом из гексогена

Условия эксперимента	Смещение, мм, в серии из 10 опытов									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\alpha = 50^\circ, p = 4.9 \text{ МПа}$	0.7	0.8	0.9	0.6	0.6	0.8	0.9	0.9	0.8	0.6
$\alpha = 50^\circ, p = 2.5 \text{ МПа}$	1.3	1.3	1.4	1.5	1.6	1.5	1.3	1.2	1.6	1.5
$\alpha = 40^\circ, p = 2.5 \text{ МПа}$	0.8	1.0	0.8	0.7	0.7	0.8	0.9	0.7	1.0	0.9

шом разбросе среднее значение нельзя использовать для расчета коэффициента трения. Поэтому расчет проводили для каждого значения смещения, при этом коэффициент трения уменьшался при увеличении смещения.

В табл. 4 представлены значения кинетического коэффициента трения порошкообразного гексогена. Они лежат в небольшом диапазоне, который обусловлен различными факторами, включая свойства гексогена и окружающие условия. Мы не могли провести сопоставление полученных результатов с известными данными по трению между гексогеном и сталью, поскольку не нашли таких данных. Однако полученные значения коэффициента трения можно сравнить с результатами определения [22] коэффициента трения ВВ double lead-2 (двухосновное катализированное твердое ракетное топливо, в состав которого входят нитроцеллюлоза, нитроглицерин, оксид свинца, динитротолуол и другие добавки в соотношении 59.5, 25, 1.2, 8.8 и 5.5 % соответственно). Коэффициент трения этого ВВ изменяется в интервале $0.01 \div 0.05$, а гексогена — $0.02 \div 0.12$, т. е. примерно в одинаковых диапазонах. Поэтому мы полагаем, что определенный коэффициент трения между порошковым гексогеном и сталью соответствует действи-

тельным значениям.

ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА КОЭФФИЦИЕНТ ТРЕНИЯ ПОРОШКООБРАЗНОГО ГЕКСОГЕНА

Рассмотрим причины разброса определенных выше значений коэффициента трения.

Гексоген — это порошковое гетерогенное ВВ, его плотность невелика даже при приложении давления. Так, при давлении $p > 2.5 \text{ МПа}$ плотность находится в диапазоне $1019 \div 1274 \text{ кг/м}^3$ (соответствующая толщина образца $\approx 0.2 \div 0.25 \text{ мм}$), что меньше теоретической — 1816 кг/м^3 . Поэтому между частицами гексогена много воздушных пустот и пузырьков [23, 24]. Пустоты распределены на контактной поверхности между верхним подвижным стержнем и ВВ, а также между его частицами. Сила трения между верхним подвижным стержнем и ВВ приводит к нагреву этих частиц, и они могут перемещаться словно газ [25]. Трение между верхним подвижным стержнем и газовыми включениями меньше, чем между этим стержнем и ВВ, и коэффициент трения уменьшается.

Частицы гексогена размером $180 \div 250 \text{ мкм}$ находятся на поверхности нижнего подвижного стержня, и нельзя гарантировать, что их распределение однородно. В результате сила трения в различных опытах сильно меняется, что приводит к изменению коэффициента трения.

Фактическая поверхность контакта между верхним подвижным стержнем и ВВ является лишь небольшой частью номинальной контактной поверхности и определяется частицами ВВ, контактирующими с верхним подвижным стержнем. Эти частицы движутся в направлении движения верхнего подвижного стержня, однако форма частиц различна от опыта к опыту [26] и в зависимости от этого сила трения меняется, поэтому результаты опре-

Таблица 4

Кинетический коэффициент трения между гексогеном и сталью

Угол отклонения, град	Давление, МПа	Смещение верхнего подвижного стержня, мм	Коэффициент трения
50	4.9	$0.6 \div 0.9$	$0.1 \div 0.02$
50	2.5	$1.2 \div 1.6$	$0.1 \div 0.03$
40	2.5	$0.7 \div 1.0$	$0.12 \div 0.04$

деления коэффициента трения имеют некоторый разброс.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложен метод определения кинетического коэффициента трения ВВ. Кинетический коэффициент трения между верхним и нижним стальными подвижными стержнями находится в диапазоне $0.12 \div 0.15$. Этот результат хорошо совпадает с данными [21] и показывает эффективность предложенного метода.

Определен кинетический коэффициент трения между порошкообразным гексогеном и сталью — $0.02 \div 0.12$. Указаны факторы, влияющие на коэффициент трения: размер и форма частиц гексогена, распределение частиц на поверхности нижнего подвижного стержня, наличие воздушных зазоров и пузырьков между частицами ВВ.

При дальнейшем улучшении метод может быть использован для определения кинетического коэффициента трения других порошкообразных ВВ.

Работа выполнена при поддержке Национального фонда естественных наук Китая (грант 51104091).

ЛИТЕРАТУРА

1. **Li Q. M., Chen X. W.** Dimensionless formulae for penetration depth of concrete target impacted by a non-deformable projectile // *Intern. J. Impact Eng.* — 2003. — V. 28, N 1. — P. 93–116.
2. **Li D. C., Chen L., Ding Y. S.** A model of explosion induced by friction in the process of loaded projectiles penetrating into concrete targets // *Explosion and Shock Waves.* — 2009. — V. 29, N 1. — P. 13–17.
3. **Li Y. C., Yuan F. P.** The 2-D Numerical simulation on penetrations of an overhead projectile into concrete targets // *J. Ballistics.* — 2002. — V. 14, N 1. — P. 14–19.
4. **Zhang Q., Cao Z. W.** Safety computation on vacuum clamping in explosive processing // *Comput. Aided Eng.* — 2011. — V. 20, N 1. — P. 128–131.
5. **Sivapirakasam S. P., Surianarayanan M., Swaminathan G.** Hazard assessment for the safe storage, manufacturing and handling of flash compositions // *J. Loss Prevention in the Process Industries.* — 2009. — V. 22, N 2. — P. 254–256.
6. **Rajagopalan S., Irfan M. A., Prakash V.** Novel experimental techniques for investigating time resolved high speed friction // *Wear.* — 1999. — V. 225, N 2. — P. 1222–1237.
7. **Espinosa H. D., Patanella A. J., Fischer M.** Dynamic friction measurements at sliding velocities representative of high-speed machining processes // *J. Tribology.* — 2000. — V. 122, N 4. — P. 834–848.
8. **Ogawa K.** Impact friction test method by applying stress wave // *Exp. Mech.* — 1997. — V. 37, N 4. — P. 398–402.
9. **Bragov A. M., Konstantinov A. Y., Lomunov A. K.** Determining dynamic friction using a modified Kolsky method // *Techn. Phys. Lett.* — 2008. — V. 34, N 5. — P. 439–440.
10. **Kweon G., Grift T. E., Midet D.** A spinning-tube device for dynamic friction coefficient measurement of granular fertiliser particles // *Biosystems Eng.* — 2007. — V. 97, N 2. — P. 145–152.
11. **Aphale A., Bolander N., Park J., et al.** Granular fertiliser particle dynamics on and off a spinner spreader // *Biosystems Eng.* — 2003. — V. 85, N 3. — P. 319–329.
12. **Grift T. E., Kweon G., Hofstee J. W., et al.** Dynamic friction coefficient measurement of granular fertiliser particles // *Biosystems Eng.* — 2006. — V. 95, N 4. — P. 507–515.
13. **Tian C. D., Tang D., Li D. Y., Peng Y. H.** A testing method of friction coefficient and its application in numerical simulation // *J. Plasticity Eng.* — 2008. — V. 15, N 5. — P. 53–56.
14. **Vikas P.** A pressure-shear plate impact experiment for investigating transient friction // *Exp. Mech.* — 1995. — V. 35, N 4. — P. 329–336.
15. **Richard W. K., Rodney J. C.** Analysis of tilt in the high-strain-rate pressure-shear plate impact experiment // *J. Appl. Phys.* — 1990. — V. 67, N 11. — P. 7171–7173.
16. **Irfan M. A., Prakash V.** Time resolved friction during dry sliding of metal on metal // *Intern. J. Solids and Structures.* — 2000. — V. 37, N 20. — P. 2859–2882.
17. **Jurie J. J., Le Roux P. A.** The dependence of friction sensitivity of primary explosives // *Propell., Explos., Pyrotechn.* — 1990. — V. 15, N 6. — P. 243–247.
18. **George Z. V., Deliktas B., Faghihi D., et al.** Friction coefficient evaluation using physically based viscoplasticity model at the contact region during high velocity sliding // *Acta Mechanica.* — 2010. — V. 213, N 1. — P. 39–51.
19. **Oruganti R. K., Subramanian P. R., Marte J. S., et al.** Effect of friction, backpressure and strain rate sensitivity on material flow during equal channel angular extrusion // *Mater. Sci. Eng.* — 2005. — V. A406, N 1. — P. 102–109.
20. **Кондриков Б. Н.** Общие закономерности инициирования взрыва при определенной чувствительности ВВ к удару и трению // *Физика горения и взрыва.* — 1995. — Т. 31, № 2. — С. 80–90.
21. **Cheng D. X.** *Handbook of Mechanical Design.* — Beijing, 2008.

22. **Bai R. Y.** Measuring of the friction coefficient of double-base propellants // Chin. J. Explos. Propell. — 1983. — V. 9, N 1. — P. 51–57.
23. **Andersen W. H.** Role of the friction coefficient in the frictional heating ignition of explosives // Propell. Explos. — 1981. — V. 6, N 1. — P. 17–23.
24. **Armstrong R. W., Ammon H. L., Elban W. L., et al.** Investigation of hot spot characteristics in energetic crystals // Thermochem. Acta. — 2002. — V. 384, N 1. — P. 303–313.
25. **Peterson P. D.** Individual contributions of friction and impact on non-shock initiation of high explosives // Shock Compression of Condensed Matter — 2007. — Hawaii: AIP Press, 2007. — P. 983–98651–57.
26. **Fathollahi M., Pourmortazavi S. M., Hosseini S. G.** The effect of the particle size of potassium chlorate in pyrotechnic compositions // Combust. Flame. — 2004. — V. 138, N 3. — P. 304–306.

*Поступила в редакцию 12/VI 2012 г.,
в окончательном варианте — 2/II 2013 г.*
