

УДК 532.5

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФОРМЫ ПУЗЫРЬКА, ОБРАЗУЮЩЕГОСЯ ПРИ ПОДВОДНОМ ГОРЕНИИ ПИРОТЕХНИЧЕСКОЙ СМЕСИ

© 2021 г. Оуян Ди-хуа<sup>a,\*</sup>, Чжан Цянь-тао<sup>b,\*\*</sup>, Го Сань-сюэ<sup>c</sup>

<sup>a</sup> School of Resources Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Shanxi Xi'an 710055, PR China

<sup>b</sup> Shanxi Institute of International Trade, Shanxi Xianyang 712046, PR China

<sup>c</sup> Engineering University of Chinese Armed Police Force, Shanxi Xi'an 710086, PR China

\*E-mail: oydh2013@126.com

\*\*E-mail: zqt0526@163.com

Поступила в редакцию 02.02.2020 г.

После доработки 21.06.2020 г.

Принята к публикации 21.06.2020 г.

При помощи программного обеспечения AutoCAD определены формы пузырьков, образующихся при подводном горении пиротехнических смесей. Для валидации метода проведено сравнение полученных при его помощи результатов с результатами, определенными двумя другими методами. Во-первых, выполнено сравнение периметра и площади монеты достоинством в один юань и двенадцатиугольника, вычисленных по геометрическим формулам и посредством методики AutoCAD. Во-вторых, периметры и площади пузырьков были вычислены на основе AutoCAD и методом, известным из литературы. Результаты сравнений показывают, что площади и периметры, рассчитанные различными методами, хорошо согласуются друг с другом. Таким образом, методика AutoCAD открывает новые возможности для определения формы пузырьков.

*Ключевые слова:* измерения, подводное горение, пузырьки

**DOI:** 10.31857/S0568528121010102

Пиротехнические композиции обычно представляют собой смеси различных веществ, таких как окислитель, горючее вещество, связывающий материал и т.д. [1]. Их воспламенение под водой возможно без доступа воздуха. При длительном и устойчивом подводном горении пиротехнические вещества образуют большое количество высокотемпературных газов и твердых остатков, принимающих форму многочисленных пузырьков. Французская пиротехническая компания Lacroix Defense Group разработала пиротехнически-акустический преобразователь, показывающий, что подводное горение пиротехнических веществ может иметь применение в подводной акустике [2]. В работах [3, 4] выполнены начальные исследования по этой теме, результаты которых показали, что образование пузырьков и выпуск их облака являются источниками значительного шума [3, 4]. Как известно из литературы [5], шум, излученный единичным пузырьком (монополем), может быть определен по общей акустической теории

$$p_s(r, t) = \frac{\rho_0 \cdot \ddot{V}(t)}{4\pi \cdot r} \quad (0.1)$$

Здесь  $p_s(r, t)$  – звуковое давление (в паскалях),  $\rho_0$  – плотность воды (в кг/м<sup>3</sup>),  $\ddot{V}(t)$  – ускорение, с которым изменяется объем пузырька (в м<sup>3</sup>/с<sup>2</sup>), и  $r$  – расстояние от произвольной точки до центра пузырька (в метрах). Из формулы (0.1) можно видеть, что интенсивность источника звука пропорциональна ускорению, с которым изменяется объем пузырька. Разумеется, размеры и форма пузырька оказывают большое влияние на его эволюцию [6]. Поэтому для изучения характеристик акустического излучения при подводном горении пиротехнических веществ совершенно необходимо исследование формы пузырьков.

Однако предыдущие исследования пузырьков, образующихся при горении пиротехнических средств, были в основном сосредоточены на изучении их динамических характеристик [7–9] и, насколько известно авторам, имеется очень мало работ, посвященных эволюции формы пузырьков. Для исследования образования, подъема, разрушения и размеров пузырьков других видов



Рис. 1. Образец пиротехнического заряда.

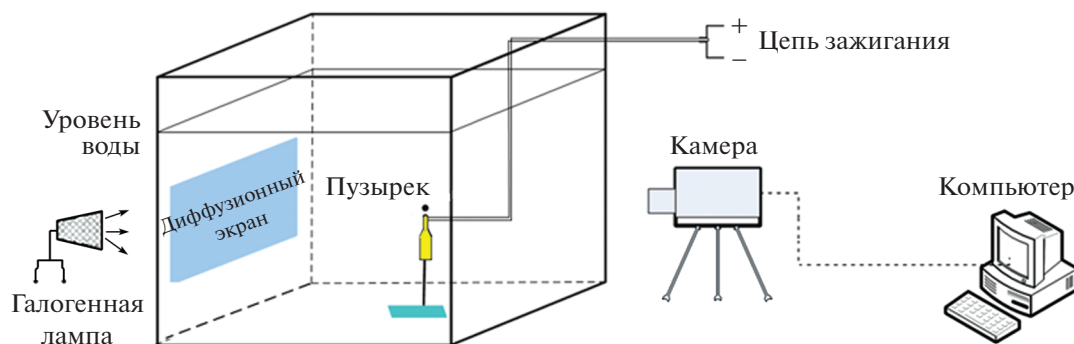


Рис. 2. Схема экспериментальной установки.

широко использовались фотографирование, трассерная визуализация потока (PIV) и численное моделирование [10–15]. Однако двумя основными аспектами указанных методов являются фотосъемка с высокой скоростью и обработка изображений с использованием сложной техники. В то же время программное обеспечение AutoCAD применялось для определения площадей костей, зубов и т.д. в медицине [16] и площадей листового покрова в сельском хозяйстве [17]. Считается, что данный метод измерений обладает высокой точностью и достоверностью [18].

В настоящей работе предпринята попытка определения формы пузырьков, образующихся при горении пиротехнических смесей, посредством простого метода. Ниже приводятся его описание и валидация путем сравнения с другими методами.

## 1. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА И МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЙ

### 1.1. Эксперимент

**1.1.1. Приготовление пиротехнических образцов.** Пиротехнические вещества, состоящие из окислителя, горючего вещества и связующего материала, сдавливали в зерна плотностью  $1600 \text{ кг/м}^3$ , диаметром 18 мм и весом 10 г и помещали в оболочку собственного изготовления. Пиротехнический заряд с соплом диаметром 15 мм изображен на рис. 1.

**1.1.2. Экспериментальная установка и оборудование.** Эксперименты были выполнены в прозрачном лабораторном резервуаре, длиной и шириной по 2 м и глубиной 1.5 м; резервуар наполнили пресной водой. Генерация пузырьков фиксировалась высокоскоростной видеокамерой (Motion System 8000S, MASD-Red Lake Inc.) со скоростью 1000 кадров в секунду. Изображения оцифровывались непосредственно в камере. Освещение производилось галогеновой лампой мощностью 450 Вт, которая освещала заднюю стенку резервуара. Противоположная стенка была покрыта диффузионным экраном, чтобы в максимально возможной степени избежать отражения и преломления света (рис. 2). Данные оцифровывались, хранились и обрабатывались в персональном компьютере. Эксперимент повторяли пять раз в одних и тех же условиях.

### 1.2. Обработка изображений пузырьков

На первом шаге обработки оригинальная фотография преобразуется в полутоновое изображение и подвергается пространственной фильтрации для увеличения отношения сигнал–шум.

На втором шаге отобранные и обработанные изображения импортируются в программу AutoCAD, причем импортрование проводится следующим образом:

(1) ввести команду “Image attach” в командную строку AutoCAD и нажать “Enter”, с тем чтобы открыть диалоговое окно справочного файла (select reference file dialog box);

(2) найти путь импорта изображения; при импорте следует указать опорную точку (по умолчанию это будет левый нижний угол изображения), задать процентное отношение изображения (обычно 1) и, наконец, нажать “Enter” для завершения операции.

На третьем шаге определяется размер диаметра сопла на изображении, с тем чтобы рассчитать фактор уменьшения/увеличения  $N$ .

На четвертом шаге рассчитывается фактор уменьшения/увеличения  $N$ . Величина  $N$  может быть определена сравнением действительного диаметра сопла ( $D_1 = 15$  мм) с диаметром  $D_2$ , определенным системой AutoCAD

$$N = \frac{D_1}{D_2} \quad (1.1)$$

На пятом шаге рассчитываются площадь  $A$  и периметр  $P$  объекта.

После того как в командной строке системы AutoCAD набрано “BOUNDARY” или выбрано меню “DRAW”/“BOUNDARY”, система открывает диалоговое окно “Boundary Creation” (Создание границы). Выберите объекты, для которых последовательно будут совершаться построения и нажмите “Enter”, чтобы завершить отбор. Система запросит сведения для построений. Для объектов, построение которых уже выполнено, введите “AREA” в командную строку и затем наберите “A” (система проводит суммирование площадей различных объектов). Согласно указаниям системы, нажмите на объекты, площади которых должны быть последовательно рассчитаны. Система автоматически вычислит площадь  $A_1$  и периметр  $P_1$  объекта.

Поскольку сопла и пузырьки находятся на одном изображении, они имеют один и тот же фактор уменьшения/увеличения  $N$ . Таким образом, сопло можно использовать как опорный объект, а площадь и периметр пузырька определять по формуле

$$A = A_1 \cdot N \quad (1.2)$$

$$P = P_1 \cdot N \quad (1.3)$$

Здесь  $A$  и  $P$  – действительные площадь и периметр пузырька, а  $A_1$  и  $P_1$  – аналогичные величины, определенные системой AutoCAD.

На шестом шаге определяется форма пузырька. В настоящей работе для описания формы пузырька используется степень его округлости  $C$ , которую с использованием уравнения (1.3) можно вычислить по формуле

$$C = \frac{2\sqrt{\pi \cdot A}}{P} \quad (1.4)$$

Здесь  $0 < C \leq 1$ . Чем больше величина  $C$ , тем ближе форма пузырька к окружности. При  $C = 1$  пузырек представляет собой совершенную окружность.

## 2. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

### 2.1. Сравнение геометрических расчетов и расчетов системы AutoCAD

На рис. 3а и 3б представлены монета в один юань и двенадцатиугольная фигура. Монета представляет собой совершенную окружность диаметром 25 мм, так что ее площадь и периметр (длина окружности) определяются формулами

$$A = \pi \cdot r^2 = 3.14 \times 1.25^2 = 4.906 \text{ см}^2 \quad (1.5)$$

$$P = 2\pi \cdot r = 2 \times 3.14 \times 1.25 = 7.850 \text{ см} \quad (1.6)$$

где  $r$  – радиус монеты.

Геометрическая фигура на рис. 3б представляет собой правильный двенадцатиугольник с диаметром описанной окружности 60 мм и стороной 15.53 мм. На каждой стороне этого внутреннего многоугольника построен равнобедренный треугольник со стороной 15.53 мм и высотой 10 мм. Можно вычислить площади и периметры построенных фигур. Так, площадь внутреннего двенадцатиугольника составляет

$$A_a = \frac{1}{2} \cdot a \cdot R \cdot \cos\left(\frac{360}{2n} \cdot \frac{\pi}{180}\right) \cdot n = \frac{1}{2} \cdot a \cdot R \cdot \cos\left(\frac{\pi}{n}\right) \cdot n \quad (1.7)$$

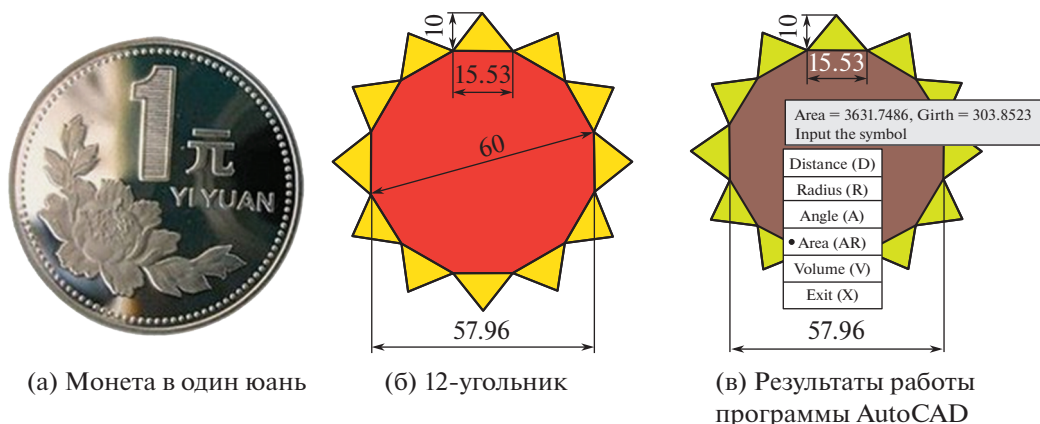


Рис. 3. Изображения двух различных объектов.

где  $a$  – сторона правильного многоугольника, равная 1.553 мм,  $R$  – радиус окружности, описанной вокруг многоугольника, равный 3.0 см, и  $n$  – число сторон многоугольника, т.е. 12. Таким образом

$$A_a = \frac{1}{2} \cdot 1.553 \cdot 3 \cdot \cos\left(\frac{\pi}{12}\right) \cdot 12 = 27.0015 \text{ см}^2 \tag{1.8}$$

Площадь треугольника равна

$$A_b = \frac{1}{2} \cdot a \cdot h = \frac{1}{2} \cdot 1.553 \cdot 1 = 0.7765 \text{ см}^2 \tag{1.9}$$

где  $h$  – высота треугольника, равная 1.0 см.

Итак, площадь окончательной двенадцатиугольной фигуры равна

$$A = A_a + 12 \times A_b = 27.0015 + 12 \times 0.7765 = 36.3195 \text{ см}^2 \approx 36.3120 \text{ см}^2 \tag{1.10}$$

Периметр фигуры

$$P = \sqrt{\left(\frac{a}{2}\right)^2 + h^2} \times 2 \times n = \sqrt{\left(\frac{1.553}{2}\right)^2 + 1^2} \times 2 \times 12 = 30.3859 \text{ см} \approx 30.386 \text{ см} \tag{1.11}$$

В табл. 1 приведены результаты расчетов площадей и периметров по геометрическим формулам (1.5)–(1.11); там же приведены результаты, полученные системой AutoCAD. Можно видеть, что результаты расчетов хорошо согласуются друг с другом. Отсюда следует, что методика AutoCAD может быть использована для определения площадей и периметров различных объектов.

### 2.2. Определение формы пузырька при помощи системы AutoCAD

На рис. 4 показано образование пузырька при подводном горении пиротехнической смеси, а на рис. 5 представлены соответствующие формы контура пузырька. Далее при помощи системы AutoCAD можно определить площади и периметры пузырьков. Так, на рис. 6 приведены резуль-

Таблица 1. Сравнение экспериментальных и рассчитанных значений площадей и периметров двух разных объектов

Объект	Площадь, см <sup>2</sup>		Периметр, см		Ошибка, %	
	Формула	AutoCAD	Формула	AutoCAD	Площадь	Периметр
Монета	4.906	4.909	7.850	7.854	0.061	0.051
12-угольник	36.320	36.317	30.386	30.385	-0.008	-0.003

\*Ошибка = [Площадь<sub>(AutoCAD)</sub> – Действительная площадь]/Действительная площадь × 100; Действительная площадь вычисляется по формулам (2.1) и (2.6).

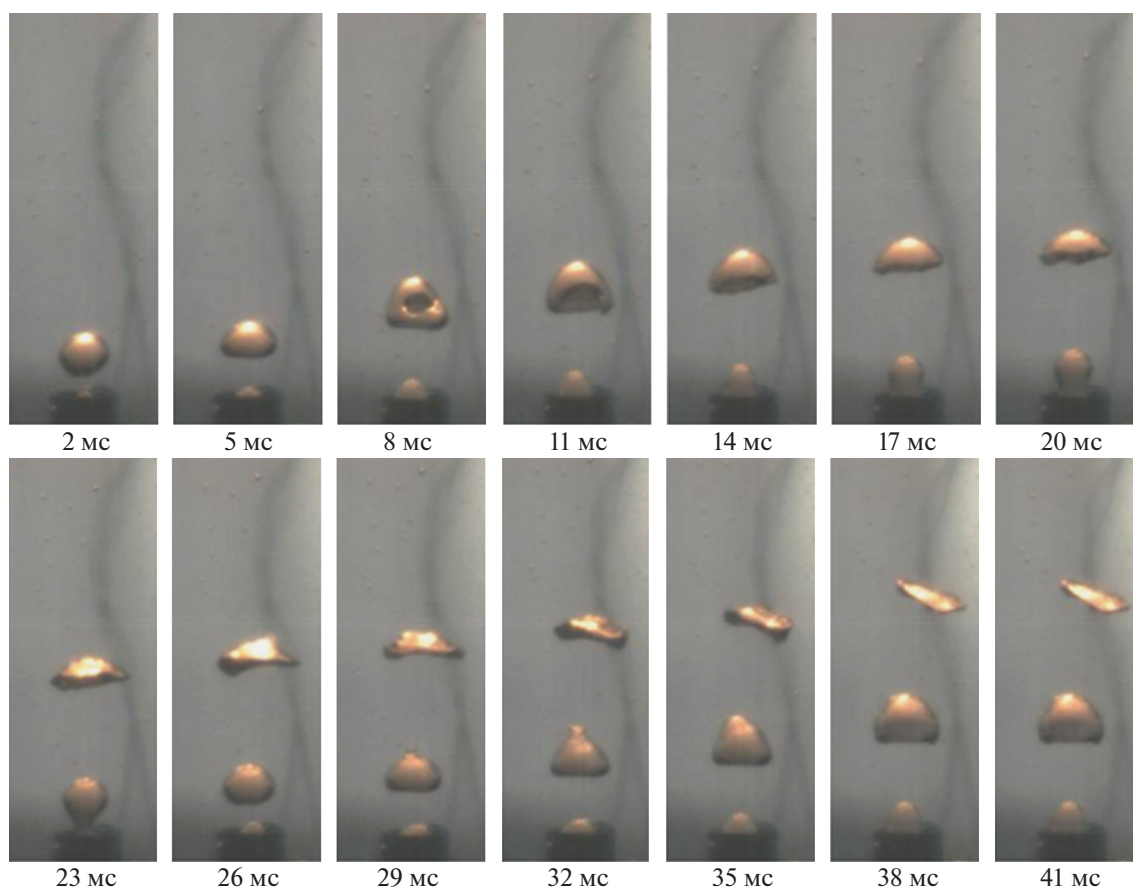


Рис. 4. Образование пузырька при подводном горении пиротехнической смеси.

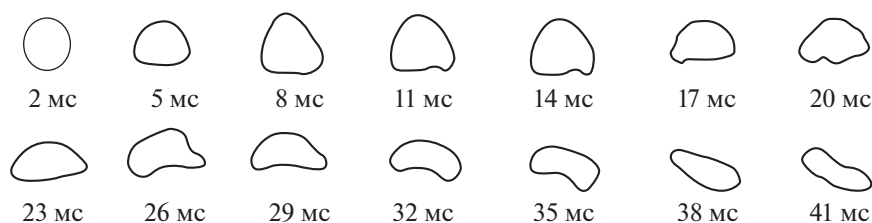


Рис. 5. Контуры пузырька.

таты пяти расчетов при помощи описанной выше методики AutoCAD. На основании этих расчетов при помощи матобеспечения Origin были рассчитаны стандартные таблицы отклонений. В работе [19] были изучены характеристики пузырьков, образующихся в электролизных ваннах Холла–Эрульта. Изображения поднимающегося пузырька фиксировались со скоростью съемки 5000 кадров в секунду и затем обрабатывались при помощи стандартной процедуры, содержащейся в системе MATLAB. В настоящей работе для валидации методики AutoCAD использован тот же метод обработки изображений пузырьков, что и в [19]. Результаты представлены на рис. 7 и 8. Можно видеть, что площади и периметры пузырьков, определенные методом [19] и при помощи системы AutoCAD, хорошо согласуются друг с другом; средние значения отклонений результатов, полученных двумя методами, составляют 3.62% по площади и 3.83% по периметру. На ранней стадии, когда пузырьки имеют еще достаточно округлую форму, и их геометрические параметры могут быть определены с большей точностью, согласование результатов лучше. На более поздней стадии, по мере подъема пузырьков сложность расчетов возрастает и отклонение результатов растет.

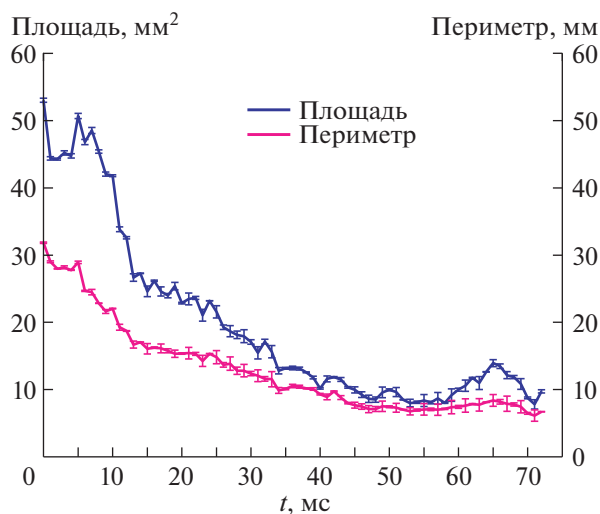


Рис. 6. Зависимость площади и периметра пузырька от времени.

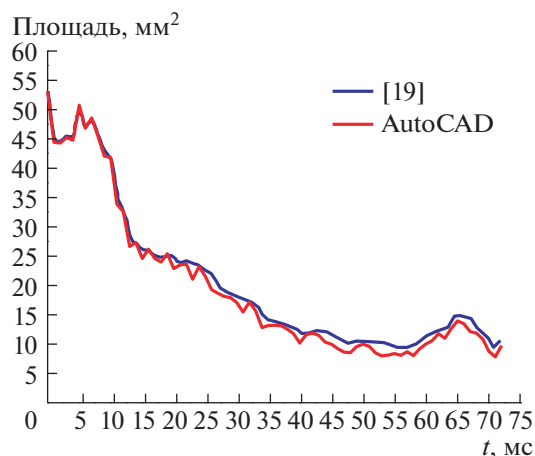


Рис. 7. Зависимость площади пузырька, рассчитанной двумя методами, от времени.

По данным, представленным на рис. 7 и 8, и уравнению (1.4) можно определить степень округлости пузырьков; результаты таких расчетов приведены на рис. 9. Можно видеть, что по мере того, как пузырек поднимается со временем, его форма постепенно отклоняется от круговой и соответствующий параметр  $C$  уменьшается от 1 до 0.78. Этот результат соответствует изображениям, представленным на рис. 4.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе форма пузырьков, образующихся при подводном горении пиротехнической смеси, определена при помощи программного обеспечения AutoCAD. Площади и периметры модельных объектов и пузырьков вычислены по геометрическим формулам в первом случае и согласно методике, предложенной в работе [19], во втором случае; затем проведено сравнение полученных результатов с результатами, определенными системой AutoCAD. Сравнение показало, что все найденные результаты хорошо согласуются друг с другом. Таким образом, данный новый метод может быть применен для оценки формы пузырьков, возникающих при подводном горении пиротехнических композиций, так же как и различных объектов нерегулярной формы.

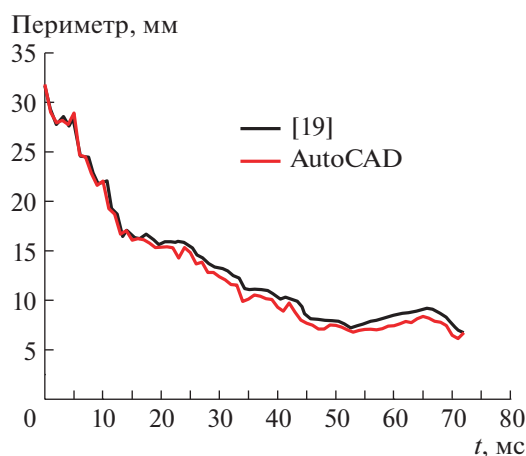


Рис. 8. Зависимость периметра пузырька, рассчитанного двумя методами, от времени.

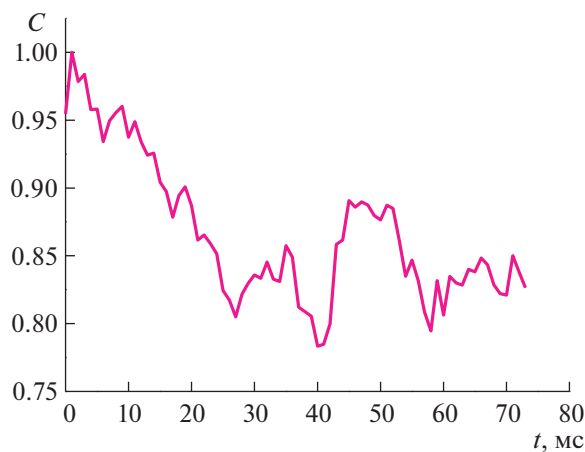


Рис. 9. Зависимость степени округлости пузырька от времени.

Работа поддержана Национальным фондом естественных наук Китая (грант № 51506222), Национальным научным фондом провинции Шаньси (грант № 2016JQ5085) и Техническим университетом Вооруженных полицейских сил Китая (грант № WJY201510).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Pan G.P., Yang S.* Principle of pyrotechnics. Beijing: Beijing University of Science & Technique Press, 1997 [на китайском языке].
2. *Massimo A.* Anti-torpedo defence systems // *Military Technique*. 1995. № 10. P. 10–16.
3. *Ouyang D.H., Guan H., Pan G.P., Du X.F., Fan L., Lv H.P.* Study on the bubble and noise of exit from pyrotechnic composition combustion underwater base on high speed photography // *Acta Acustica*. 2010. V. 35. № 6. P. 641–645 [на китайском языке].
4. *Ouyang D.H., Guan H., Pan G.P., Du X.F.* Mechanism and experimental research on acoustic radiation of pyrotechnic composition combustion underwater // *J. Exp. Fluid Mech*. 2010. V. 24. № 5. P. 74–78 [на китайском языке].
5. *Ross D.* Mechanics of underwater noise. New York: Pergamon Press, 1976.
6. *Abbassi W., Besbes S., El Hajem M., Ben Aissia H., Champagne J.Y., Jay J.* Influence of operating conditions and liquid phase viscosity with volume of fluid method on bubble formation process // *Europ. J. Mech. B/Fluids*. 2017. V. 65. P. 284–298.
7. *Li J., Guan H., Song D.M., Wang Q., Du J.* Experimental study on bubble movement characteristics during underwater pyrotechnic combustion // *Flow, Turbulence and Combustion*. 2014. V. 93. № 2. P. 249–258.
8. *Ouyang D.H., Duan D.L., Zou Y.X.* Effects of various additives on the characteristic of bubbles originating from the combustion of pyrotechnic mixtures // *Central European J. Energetic Materials*. 2014. V. 11. № 4. P. 603–611.
9. *Ouyang D.H., Zhang Q.T., Wang F.* Experimental and numerical investigation of effects of charge density on the bubble characteristics originating from the combustion of pyrotechnic mixtures // *Flow, Turbulence and Combustion* // 2016. V. 97. № 3. P. 865–874.
10. *Kazuhiro Kaiho, Tomio Okawa, Koji Enoki.* Measurement of the maximum bubble size distribution in water sub-cooled flow boiling at low pressure // *Intern. J. Heat Mass Transfer*. 2017. V. 108. P. 2365–2380.
11. *Murgan I., Bunea F., Ciocan G.D.* Experimental PIV and LIF characterization of a bubble column flow // *Flow Measurement & Instrumentation* // 2017. V. 54. P. 224–235.
12. *Ивашнев О.Е., Ивашнева М.Н., Смирнов Р.Н.* Ударные волны разрежения в потоках неравновесно кипящей смеси // *Известия РАН. МЖГ*. 2000. № 4. С. 20–33.
13. *Ivashnyov O.E., Ivashneva M.N., Smirnov N.N.* Slow waves of boiling under hot water depressurization // *J. Fluid Mech*. 2000. V. 413. P. 149–180.
14. *Ивашнев О.Е., Смирнов Р.Н.* Тепловой рост парового пузырька, движущегося в перегретой жидкости // *Известия РАН. МЖГ*. 2004. № 3. С. 69–84.
15. *Geng Li, Bin-bin Wang, Hui-jie Wu, Di Marco S.F.* Impact of bubble size on the integral characteristics of bubble plumes in quiescent and unstratified water // *Intern. J. Multiphase Flow*. 2020. V. 125. 103230.
16. *Santana L., Guadagnin R., Reis C.L.D., Cavalcante J.M., et al.* Area evaluation using image processing tools: An applied study to pressure ulcer monitoring // *Pattern Recognition and Image Analysis*. 2010. V. 20. № 2. P. 220–224.
17. *Rico-García E., Hernández-Hernández F., Soto-Zarazúa G., Herrera-Ruiz G.* Two new methods for the estimation of leaf area using digital photography // *Intern. J. Agriculture. Biology*. 2009. V. 11. № 4. P. 397–400.
18. *Almeida C.A.M., Schellini S.A., Gregório E.A., Pellizzon C.H.* Utilização do AutoCAD 2004 para quantificação de pesquisas usando fotomicrografias eletrônicas // *Revista Brasileira Oftalmologia*. 2007. V. 66. № 4. P. 227–230.
19. *Das S., Morsi Y., Brooks G., et al.* Experimental investigation of single bubble characteristics in a cold model of a Hall–Héroult electrolytic cell // *TMS Light Metals*. 2001. P. 575–580.