

## ПРИКЛАДНАЯ МАТЕМАТИКА И МЕХАНИКА

DOI 10.15507/2079-6900.19.201701.117-125

УДК 517.925:51-74

**Исследование плоского движения одиночного шарика  
внутри шаровой мельницы**© А. О. Сыромясов<sup>1</sup>, А. И. Попов<sup>2</sup>, В. Ф. Першин<sup>3</sup>

**Аннотация.** Изучена простейшая модель процесса получения графитной смазки с наноразмерными пластинками путем механического расслоения графита. Шарик, помещенный внутрь шаровой мельницы, находится под действием силы тяжести и испытывает трение со стороны мельницы. Оба тела начинают движение из состояния покоя, причем режим разгона мельницы известен заранее. Теоретически шарик может двигаться в одном из двух режимов: с проскальзыванием относительно поверхности или без него. Показано, что при реальных технологических и конструктивных параметрах работы механизма уравнения движения шарика линейризуются, а он сам совершает колебания, близкие к гармоническим. Найдена частота этих колебаний, а также оценки для возникающих в системе сил трения и нормальной реакции. Получено условие перехода движения шарика в режим проскальзывания.

**Ключевые слова:** графеновые нанопластинки, графитовая смазка, шаровая мельница, несвободное движение тела, гармонические колебания, линейризация обыкновенных дифференциальных уравнений.

**1. Введение**

Одним из перспективных направлений в производстве наноструктурированных материалов является их создание на основе углерода. Данные материалы обладают высокой прочностью, упругостью, химической стойкостью, повышенной электро- и теплопроводностью, а при добавлении в композиты могут существенно изменять их свойства.

Одним из видов таких материалов являются графеновые нанопластинки (ГНП). Активное применение ГНП в промышленности сдерживается отсутствием промышленных методов их производства и высокой себестоимостью получаемых композитов.

Большинство из методов получения ГНП основано на проведении различных химических реакций и выращивании нанопластинок на подложке. Однако интерес представляет

<sup>1</sup> **Сыромясов Алексей Олегович**, доцент кафедры прикладной математики, дифференциальных уравнений и теоретической механики, ФГБОУ ВО “МГУ им. Н. П. Огарёва” (430005, Россия, Республика Мордовия, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68), кандидат физико-математических наук, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6520-0204>, [syal1@yandex.ru](mailto:syal1@yandex.ru)

<sup>2</sup> **Попов Андрей Иванович**, доцент кафедры “Техника и технологии производства нанопродуктов”, ФГБОУ ВО “Тамбовский государственный технический университет” (392000, Россия, Тамбовская область, г. Тамбов, ул. Советская, д. 106), кандидат педагогических наук, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0297-2076>, [olimp\\_porov@mail.ru](mailto:olimp_porov@mail.ru)

<sup>3</sup> **Першин Владимир Федорович**, профессор кафедры “Техническая механика и детали машин”, ФГБОУ ВО “Тамбовский государственный технический университет” (392000, Россия, Тамбовская область, г. Тамбов, ул. Советская, д. 106), доктор технических наук, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0213-9001>, [pershin.home@mail.ru](mailto:pershin.home@mail.ru)

механическое расслоение графита, содержащего в своей структуре графеновые слои. Получаемые при этом ГНП могут иметь практическое значение при совершенствовании графитной смазки, выпускаемой в настоящее время по ГОСТ 3333–80. Данная смазка широко используется для пуска и приработки трущихся поверхностей двигателей внутреннего сгорания, в различных гидроустановках, при эксплуатации канатов, для смазывания муфт больших размеров, работающих в тяжелых режимах, в рессорах, торсионных подвесках гусеничных машин, в открытых шестернях и др.

Установлено, что коллоидальный графит в присутствии масла в результате адсорбции образует на трущихся поверхностях пленку, проникает и удерживается даже в мельчайших неровностях и порах металла [1]. Это дало возможность предположить, что при переходе к графеновым структурам, и прежде всего к ГНП, отмеченный эффект существенно усилится. Получить ГНП возможно путем механоактивации в различного рода барабанных аппаратах [2], шаровых [3] и планетарных мельницах [4]. Расщепление графита проводилось в различных средах, например, в органических растворителях [5], в водном растворе додецилсульфоната натрия [6] или в присутствии добавок поверхностно-активных веществ [7]. Анализ результатов данных исследований свидетельствует, что при механоактивации возможно получить графитовую смазку с присутствием графеновых наноструктур, повышающих ее эксплуатационные характеристики.

При взаимодействии с мелющими шарами в обрабатываемом материале возникают как нормальные, так и касательные напряжения, причем последние для получения ГНП будут наиболее эффективны [8]. При проведении экспериментов по исследованию движения мелющих шаров в барабанной и планетарной мельницах [9] было обнаружено периодическое проскальзывание всей загрузки относительно обечайки барабана. При этом касательные напряжения в материале, находящемся между шарами и обечайкой, становятся максимальными, что способствует сдвигу слоев графита относительно друг друга и может привести к образованию ГНП.

Тем самым, получение ГНП посредством механоактивации является сложным процессом; его подробное изучение невозможно без математического моделирования происходящих в оборудовании явлений. Особый интерес представляет определение технологических (скорость вращения барабана) и конструктивных (размеры барабана и мелющих шаров) параметров, при которых наблюдается проскальзывание шаров по обечайке.

В настоящей работе моделируется движение одиночного мелющего шара внутри шаровой мельницы и исследуется возможность перехода этого движения в режим с проскальзыванием.

## 2. Математическая модель движения одиночного шарика

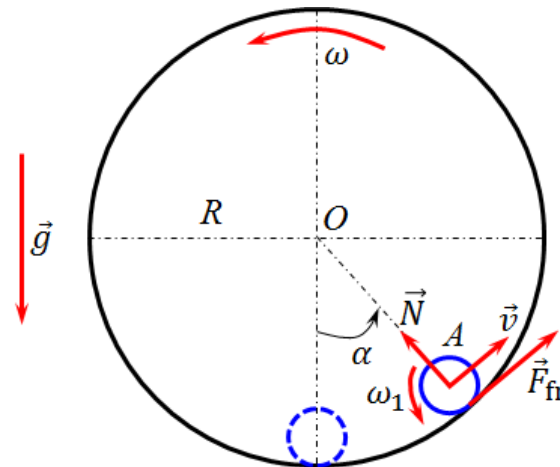
Барабан радиуса  $R$ , моделирующий мельницу, находится в вертикальной плоскости; ускорение  $\vec{g}$  силы тяжести направлено вниз. Шарик с массой  $m$ , радиусом  $r < R$  и центром  $A$  соприкасается с внутренней поверхностью барабана. Положение шарика описывается величиной  $\alpha$  – углом отклонения радиус-вектора точки  $A$  относительно центра мельницы  $O$ , отсчитанным от вертикали против часовой стрелки (рис. 2.1).

Мельница вращается с угловой скоростью  $\omega$ , из-за чего шарик начинает прокатываться по поверхности с некоторой угловой скоростью  $\omega_1$ , а его центр масс  $A$  движется со скоростью  $\vec{v}$ . Очевидно,

$$v = (R - r) \frac{d\alpha}{dt}, \quad (2.1)$$

при этом  $\vec{v}$  перпендикулярна уже упомянутому вектору  $\vec{OA}$ .

Помимо силы тяжести, на шарик действуют сила нормальной реакции  $\vec{N}$ , ориентированная к центру мельницы, и сила трения  $\vec{F}_{\text{fr}}$ . При этом векторы  $\vec{F}_{\text{fr}}$  и  $\vec{v}$  сонаправлены, поскольку направление силы трения согласовано с вращением шарика.



Р и с у н о к 2.1

Геометрия задачи и силы, приложенные к мелющему шару

В проекциях на оси касательной и главной нормали к траектории движения дифференциальные уравнения движения шарика таковы:

$$m \frac{dv}{dt} = F_{\text{fr}} - mg \sin \alpha, \tag{2.2}$$

$$m \frac{v^2}{R - r} = N - mg \cos \alpha, \tag{2.3}$$

здесь и далее  $v$  вычисляется согласно (2.1), а  $t$  есть время.

Вращение шарика вокруг его оси симметрии описывается уравнением

$$I \frac{d\omega_1}{dt} = r F_{\text{fr}}, \tag{2.4}$$

поскольку только сила трения имеет ненулевой момент относительно точки  $A$ . Здесь  $I = 2mr^2/5$  есть момент инерции шарика относительно оси, проходящей через его центр.

Система (2.1)–(2.4) содержит пять неизвестных функций времени:  $v$ ,  $\alpha$ ,  $F_{\text{fr}}$ ,  $N$ ,  $\omega_1$ . Для ее замыкания следует учесть, что движение шарика может происходить в одном из двух альтернативных режимов:

- Движение без проскальзывания, при котором скорость точки соприкосновения шарика с барабаном равна скорости соответствующей точки мельницы, а сила трения меньше своего предельного значения:

$$v + \omega_1 r = \omega R, \tag{2.5}$$

$$F_{\text{fr}} < fN. \tag{2.6}$$

- Проскальзывание шарика по поверхности мельницы, при котором точка соприкосновения шарика с поверхностью опережает соответствующую точку самой поверхности, а сила трения принимает предельное значение:

$$v + \omega_1 r > \omega R, \tag{2.7}$$

$$F_{\text{fr}} = fN. \tag{2.8}$$

Безразмерная величина  $f$  есть коэффициент трения.

Режим вращения самой мельницы известен заранее. До момента  $t = t_m$  она с постоянным угловым ускорением  $\epsilon$  разгоняется из состояния покоя до максимальной угловой скорости  $\omega_m = \epsilon t_m$ , после чего вращается равномерно:

$$\omega = \begin{cases} \epsilon t, & 0 \leq t \leq t_m, \\ \omega_m, & t > t_m. \end{cases} \quad (2.9)$$

Одно из двух соотношений (2.5) или (2.8) замыкает систему уравнений движения. Выбор конкретного соотношения производится исходя из того, какое условие – (2.6) или (2.7) – выполняется в данный момент времени.

В начальный момент времени шарик покоится в нижней точке барабана:

$$\alpha(0) = 0, \quad v(0) = 0, \quad \omega_1(0) = 0, \quad N(0) = mg, \quad F_{\text{fr}}(0) = 0, \quad (2.10)$$

так что при  $t = 0$  выполнено условие (2.6). Следовательно, шарик начнет двигаться, не скользя по обечайке.

Как было сказано выше, с точки зрения получения ГНП интерес представляет движение мелющего шара со скольжением. Поэтому важной задачей является определение условий, при которых возможен переход к данному режиму. Для этого следует предварительно изучить начинающееся при  $t = 0$  движение шарика без проскальзывания.

### 3. Режим движения шарика без проскальзывания

Рассмотрим систему (2.1)–(2.4) с присоединенными к ней условиями (2.5)–(2.6).

Из (2.1) и (2.5) вытекает, что угловая скорость шарика может быть найдена как

$$\omega_1 = \frac{R}{r}\omega - \frac{R-r}{r} \cdot \frac{d\alpha}{dt}. \quad (3.1)$$

Отсюда и из (2.4) следует, что сила трения равна

$$F_{\text{fr}} = \frac{2}{5}m \left[ R \frac{d\omega}{dt} - (R-r) \frac{d^2\alpha}{dt^2} \right]. \quad (3.2)$$

Подстановка (2.1) и (3.2) в (2.2) после очевидных упрощений приводит к следующему уравнению для  $\alpha(t)$ :

$$\frac{d^2\alpha}{dt^2} + \Omega^2 \sin \alpha = K \frac{d\omega}{dt}, \quad (3.3)$$

где введены обозначения

$$\Omega^2 = \frac{5}{7} \cdot \frac{g}{R-r}, \quad K = \frac{2}{7} \cdot \frac{R}{R-r}. \quad (3.4)$$

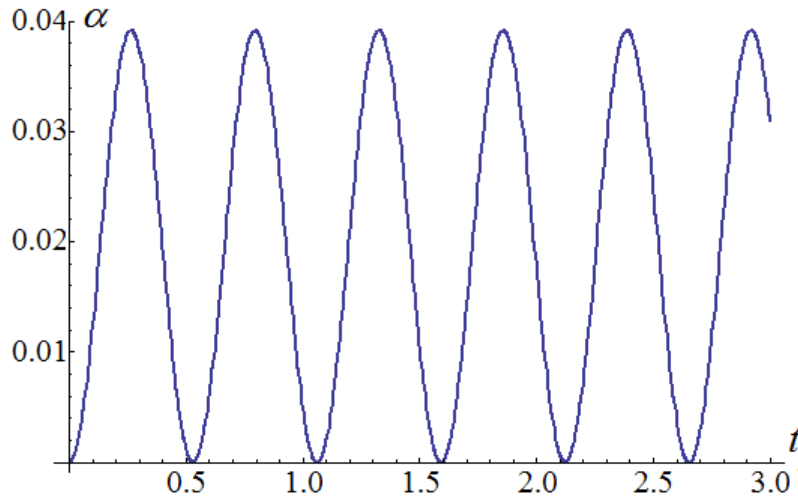
Начальные данные к этому уравнению легко найти из (2.1) и (2.10):

$$\alpha(0) = 0, \quad \left. \frac{d\alpha}{dt} \right|_{t=0} = 0. \quad (3.5)$$

Уравнение (3.3) с условиями (3.5) и дополнительными соотношениями (2.9) и (3.4) является основным при описании динамики шарика в режиме без проскальзывания. Зная  $\alpha(t)$ , можно легко найти кинематические характеристики этого тела, а также нормальную и касательную реакции из равенств (2.1), (2.3), (3.1) и (3.2).

Вначале задача (3.3)–(3.5) была исследована численно при  $t \in [0; t_m]$ ; при этом значения параметров соответствовали реальным характеристикам механизма. Мелющий шар был железным (плотность  $\rho = 7860$  кг/м<sup>3</sup>), а его диаметр  $2r$  мог составлять 5, 8 или 10 мм. Диаметр барабана считался равным  $2R = 110$  мм. Максимальная угловая скорость мельницы  $\omega_m$  бралась равной 50, 100, 150, 200 и 250 об/мин, а ее время разгона  $t_m$  до этой скорости – 3 или 5 секунд. Коэффициент трения  $f$  принимал одно из двух значений: 0.05 или 0.1.

При любых комбинациях указанных параметров величина  $F_{fr} - fN$  при  $t \leq t_m$  отрицательна, т.е. перехода к проскальзыванию не происходит. Колебания угла  $\alpha$  весьма сходны с гармоническими, а их амплитуда не превышает сотых долей радиана (рис. 3.1).



Р и с у н о к 3.1

Изменение угла при  $2r = 10$  мм,  $t_m = 3$  с,  $\omega_m = 250$  об/мин,  $f = 0.1$

Поскольку угол  $\alpha$  мал, то  $\sin \alpha \approx \alpha$ . Это позволяет более подробно исследовать уравнение (3.3), линеаризовав его:

$$\frac{d^2 \alpha}{dt^2} + \Omega^2 \alpha = K \frac{d\omega}{dt}. \quad (3.6)$$

В силу (2.9) решением задачи (3.6), (3.5) при  $t \leq t_m$  является функция

$$\alpha(t) = \frac{K\epsilon}{\Omega^2} (1 - \cos \Omega t). \quad (3.7)$$

Значения периода колебаний угла  $\alpha$ , равные  $2\pi/\Omega$ , хорошо согласуются с результатами численного решения исходного нелинейного уравнения (3.3).

Наибольшее значение  $\alpha(t)$  является малой величиной. С учетом (3.4) это требование можно записать в одной из двух форм:

$$\frac{2K\epsilon}{\Omega^2} \ll 1 \Leftrightarrow \frac{R\epsilon}{g} \ll \frac{5}{4}. \quad (3.8)$$

При заданных параметрах механизма наибольшее угловое ускорение мельницы  $\epsilon = \omega_m/t_m$  равно 8.73 рад/с<sup>2</sup>, а отношение  $R\epsilon/g$  составляет 0.049. Тем самым, условие малости колебаний (3.8) выполнено и линеаризация уравнения (3.3) обоснованна.

#### 4. Переход к режиму движения с проскальзыванием

Переход к скольжению шарика по обечайке может произойти либо во время разгона мельницы, либо после установления стационарного режима ее вращения.

В первом случае выполнено равенство (3.7). Учитывая условия (3.8) и пренебрегая малыми более высокого порядка, нежели  $\alpha$ , из (2.3) и (3.2) нетрудно получить, что

$$F_{\text{fr}} - fN = mg \left[ \frac{2}{5} \cdot \frac{R\epsilon}{g} \left( 1 - \frac{2}{7} \cos \Omega t \right) - f \right].$$

Для начала скольжения требуется, чтобы величина  $F_{\text{fr}} - fN$  была неотрицательна. Принимая во внимание, что  $\cos \Omega t \geq -1$ , найдем отсюда условие возникновения проскальзывания при разгоне мельницы:

$$\frac{R\epsilon}{g} \geq \frac{35}{18} f. \quad (4.1)$$

Отметим, что при заданных технологических и конструктивных параметрах системы период колебаний угла  $\alpha$  в несколько раз меньше, чем  $t_m$ . Поэтому при  $t \leq t_m$  функция  $\cos \Omega t$  “успевает” принять минимальное значение, а следовательно, нет необходимости в построении более жестких оценок комплекса  $R\epsilon/g$ , чем неравенство (4.1).

Для описанных ранее наборов параметров условие (4.1) не выполняется, поэтому перехода к желательному режиму движения не происходит. Этот вывод подтверждается и результатами численного решения исходного уравнения (3.3).

Изучим теперь возможность перехода к скольжению шарика после окончания разгона барабана. Угол отклонения шарика от вертикали будем теперь обозначать  $\beta$ ; для удобства отсчет времени вновь начнем с нуля. Учитывая, что скорость  $\omega$  теперь постоянна и предполагая, что величина  $\beta$  также мала, по аналогии с (3.6) получим:

$$\frac{d^2\beta}{dt^2} + \Omega^2\beta = 0. \quad (4.2)$$

Начальные условия для этого уравнения вытекают из непрерывности угла отклонения и скорости его изменения:

$$\beta(0) = \alpha(t_m), \quad \left. \frac{d\beta}{dt} \right|_{t=0} = \left. \frac{d\alpha}{dt} \right|_{t=t_m}. \quad (4.3)$$

Общее решение (4.2) может быть представлено в виде

$$\beta(t) = \beta_0 \sin(\Omega t + \theta).$$

Для дальнейшего знать начальную фазу колебаний  $\theta$  не требуется, а амплитуду легко найти из (4.3):

$$\beta_0 = \frac{K\epsilon}{\Omega^2} \sqrt{2 - 2 \cos \Omega t_m}.$$

Понятно, что данное выражение не может быть больше  $2K\epsilon/\Omega^2$ . Вместе с условием (3.8) это означает, что  $\beta_0 \ll 1$ , а следовательно, угол  $\beta$  действительно мал.

Нетрудно показать, что при  $t > t_m$  из (2.1), (2.3) и (3.2) следует формула

$$F_{\text{fr}} - fN = m \left[ \frac{2}{5} (R - r) \Omega^2 \beta - f(R - r) \left( \frac{d\beta}{dt} \right)^2 - fg \right].$$

С точностью до малых первого порядка это выражение преобразуется в

$$F_{\text{fr}} - fN = mg\left(\frac{2}{7}\beta - f\right).$$

Отсюда следует, что для перехода в режим проскальзывания должно, как минимум, выполняться неравенство  $2\beta_0/7 \geq f$ . Взяв максимально возможное значение  $\beta_0$  и учитывая (3.4), получим окончательно:

$$\frac{R\epsilon}{g} \geq \frac{35}{8}f. \quad (4.4)$$

Последнее ограничение на значения параметров  $R$  и  $\epsilon$  является более жестким, чем (4.1). Поэтому если переход к режиму проскальзывания и произойдет, то это случится на этапе разгона мельницы.

Интересно, что ни один из критериев (4.1) и (4.4) не включает радиуса шарика  $r$ .

## 5. Заключение

В настоящей работе построена и исследована математическая модель движения мелющего шара внутри шаровой мельницы. В начальный момент времени шарик и мельница покоятся, затем мельница начинает вращаться, а шарик – двигаться относительно ее поверхности без проскальзывания.

Основным параметром, определяемым в рамках данной модели, служит угол  $\alpha$  отклонения шара от исходного вертикального положения. Его динамика описывается нелинейным дифференциальным уравнением (3.3). Для исследования данного уравнения была проведена серия численных экспериментов, в ходе которых выяснилось, что угол  $\alpha$  мал. Данный факт позволил упростить уравнение и получить его аналитическое решение, свойства которого были исследованы более детально.

Были изучены два этапа движения мельницы: разгон и последующее вращение с постоянной угловой скоростью. Для каждого из этих этапов получено условие перехода движения шарика в режим скольжения по обечайке. Для периода разгона данное условие оказывается более мягким. Поскольку этот этап предшествует вращению с постоянной скоростью, переход к скольжению возможен только во время разгона мельницы.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. D. Berman, A. Erdemir, A. V. Sumant, “Graphene: a new emerging lubricant”, *Materials Today*, **17**:1 (2014), 31–42.
2. В. Ф. Першин, В. Г. Однолько, С. В. Першина, *Переработка сыпучих материалов в машинах барабанного типа*, Машиностроение, М., 2009, 220 с.
3. V. Leon, M. Quintana, M. A. Herrero [et al.], “Few-layer graphenes from ball-milling of graphite with melamine”, *Chem. Commun.*, **47** (2011), 10936–10938.
4. I.-Y. Jeon, Y.-R. Shin, G.-J. Sohn [et al.], “Edge-carboxylated graphene nanosheets via ball milling”, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **109** (2012), 5588–5593.

5. C. Damm, T.-J. Nacken, W. Peukert, “Quantitative evaluation of delamination of graphite by wet media milling”, *Carbon*, **81** (2015), 284–294.
6. C. Knieke, A. Berger, M. Voigt [et al.], “Scalable production of graphene sheets by mechanical delamination”, *Carbon*, **48** (2010), 3196–3204.
7. R. Nandhini, P. A. Mini, B. Avinash [et al.], “Supercapacitor electrodes using nanoscale activated carbon from graphite by ball milling”, *Materials Letters*, **87** (2012), 165–168.
8. K. Suzuki, K. Sumiuama, “Control of structure and formation of amorphous and nonequilibrium crystalline metals by mechanical milling (Overview)”, *Materials Transactions, JIM*, **36**:2 (1995), 188–197.
9. Д. А. Ю. Аль-Саади, В. Ф. Першин, Б. Н. Салимов, С. А. Монтаев, “Механоактивация графитовой смазки в высокоскоростной планетарной мельнице”, *Вестник Тамбовского государственного технического университета*, **22**:4 (2016), 633–641.

Поступила 25.04.2017

MSC2010 34A25, 70J35

## Investigation of plane motion of a single ball inside a ball mill

© A. O. Syromyasov<sup>4</sup>, A. I. Popov<sup>5</sup>, V. F. Pershin<sup>6</sup>

**Abstract.** Simple model of producing graphite lubricant with nanosized plates via mechanical lamination of graphite is studied. A ball placed inside a ball mill is under the action of gravity force and of friction force. Both the ball and the mill begin moving from the state of rest; the mill's acceleration is supposed to be known. In theory the ball may move either with slipping along the mill's surface or without such slipping. It is shown that when the mechanism's parameters have authentic values the equations of ball's motion may be linearized. In this case the ball oscillates near-harmonically. The frequency of these oscillations is found; estimations for friction and normal reaction forces are found, too. The condition of the ball movement transition to slipping mode is obtained.

**Key Words:** graphenenanoplates, graphite lubricant, ball mill, forced motion of a body, harmonic oscillations, linearization of ordinary differential equations.

## REFERENCES

1. D. Berman, A. Erdemir, A. V. Sumant, “Graphene: a new emerging lubricant”, *Materials Today*, **17**:1 (2014), 31–42.

---

<sup>4</sup> **Aleksei O. Syromyasov**, Associate Professor, Department of Applied Mathematics, Differential Equations and Theoretical Mechanics, National Research Mordovia State University (68 Bolshevistskaya Str., Saransk 430005, Republic of Mordovia, Russia), Ph.D. (Physics and Mathematics), ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6520-0204>, [syall@yandex.ru](mailto:syall@yandex.ru)

<sup>5</sup> **Andrey I. Popov**, Associate Professor, Department “Technics and Technology of nanoproducs producing”, Tambov State Technical University (106 Sovetskaya Str., Tambov 392000, Russia), Ph.D. (Pedagogics), ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0297-2076>, [olimp\\_popov@mail.ru](mailto:olimp_popov@mail.ru)

<sup>6</sup> **Vladimir F. Pershin**, Professor, Department “Technical Mechanics and Machine Details”, Tambov State Technical University (106 Sovetskaya Str., Tambov 392000, Russia), D.Sc. (Technics), ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0213-9001>, [pershin.home@mail.ru](mailto:pershin.home@mail.ru)



2. V. F. Pershin, V. G. Odnolko, S. V. Pershina, *Pererabotka sypuchih materialov v mashinah barabannogo tipa [Treatment of bulk solids in drum-type machines]*, Mashinostroenie Publ., Moscow, 2009 (In Russ.), 220 p.
3. V. Leon, M. Quintana, M. A. Herrero [et al.], “Few-layer graphenes from ball-milling of graphite with melamine”, *Chem. Commun.*, **47** (2011), 10936–10938.
4. I.-Y. Jeon, Y.-R. Shin, G.-J. Sohn [et al.], “Edge-carboxylated graphene nanosheets via ball milling”, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **109** (2012), 5588–5593.
5. C. Damm, T.-J. Nacken, W. Peukert, “Quantitative evaluation of delamination of graphite by wet media milling”, *Carbon*, **81** (2015), 284–294.
6. C. Knieke, A. Berger, M. Voigt [et al.], “Scalable production of graphene sheets by mechanical delamination”, *Carbon*, **48** (2010), 3196–3204.
7. R. Nandhini, P. A. Mini, B. Avinash [et al.], “Supercapacitor electrodes using nanoscale activated carbon from graphite by ball milling”, *Materials Letters*, **87** (2012), 165–168.
8. K. Suzuki, K. Sumiuama, “Control of structure and formation of amorphous and nonequilibrium crystalline metals by mechanical milling (Overview)”, *Materials Transactions, JIM*, **36**:2 (1995), 188–197.
9. D. A. Yu. Al-Saadi, V. F. Pershin, B. N. Salimov, S. A. Montaev, “Mehanoaktivacija grafitovoj smazki v vysokoskorostnoj planetarnoj mel’nice [Mechanoactivation of graphite lubricant in a high-speed planetary-type mill]”, *Vestnik Tambovskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta*, **22**:4 (2016), 633–641.

*Submitted 25.04.2017*