

**ВЛИЯНИЕ РЕЖИМНЫХ И ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ  
НА КИНЕТИКУ ПРОЦЕССА ЖИДКОФАЗНОЙ  
СДВИГОВОЙ ЭКСФОЛИАЦИИ ГРАФИТА  
В СТЕРЖНЕВОЙ БАРАБАННОЙ МЕЛЬНИЦЕ**

**Г. Б. Жумагалиева<sup>1</sup>, А. А. Осипов<sup>2</sup>, В. Ф. Першин<sup>2</sup>**

*Кафедра «Технология машиностроения» (1),  
Западно-Казахстанский аграрно-технический университет  
имени Жангир хана, г. Уральск, Республика Казахстан;  
кафедра «Техника и технологии производства нанопродуктов» (2),  
ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия; pershin.home@mail.ru*

**Ключевые слова:** графит; концентрация; малослойный графен; многослойный графен; суспензия; эксфолиация.

**Аннотация:** Исследовано влияние на кинетику процесса эксфолиации графита в стержневой барабанной мельнице следующих параметров: диаметра и скорости вращения барабана; концентрации графита в исходной суспензии. Установлено, что производительность мельницы прямопропорционально зависит от указанных параметров. Предложен экспресс-метод определения концентрации малослойного и многослойного графена в масляных суспензиях. Обоснована перспективность использования барабанных стержневых мельниц для получения графеновых суспензий на основе органических жидкостей в производстве пластичных смазок, модифицированных графеновыми структурами.

---

**Введение**

После того, как были получены первые образцы графена и определены его уникальные физико-механические свойства [1], разработкой технологий получения графена активно занимаются многие ученые. Количество публикаций, в которых в той или иной степени фигурирует графен или его производные неуклонно растет. Если в 2010 г. было опубликовано примерно 4000 статей, то в 2016 – почти 25000 [2]. Аналогичная ситуация сложилась и с патентами: в 2010 г. было получено примерно 400 патентов, а в 2015 – более 6000. В последние годы повысился интерес ученых к графеновым пластинкам, которые состоят из нескольких слоев. В англоязычной научной литературе кроме термина «графен» появились термины *few-layers graphen* (малослойный графен) и *multilayer graphen* (многослойный графен). Это можно объяснить тем, что малослойный и многослойный графен стали активно использовать в качестве модификатора при создании новых конструкционных материалов. Так, например, при модифицировании эпоксидной смолы малослойным графеном ее твердость повысилась на 293 %, а модуль Юнга на 213 %, при концентрациях графена 0,7 % [3]. Отмечено снижение индекса пла-

стичности на 27 %, что повлекло за собой уменьшение ударной вязкости и отрицательно сказалось на эксплуатационных характеристиках эпоксидной смолы. Результаты проведенных опытов показали, что при концентрациях малослойного графена порядка 0,05 масс. % ударная вязкость увеличивается на 25 – 30 % [4].

Известны примеры получения хороших результатов при модифицировании малослойным графеном бетона. Авторами работы [5] получен инновационный многофункциональный нанокпозиционный бетон, демонстрирующий широкий диапазон улучшенных свойств по сравнению с исходным материалом. Модифицирование бетона осуществляли, используя в качестве воды затворения бетона суспензию, содержащую порядка 1 мг/мл малослойного графена. В результате наполнения цементной матрицы чешуйками графена происходит увеличение прочности на сжатие и изгиб на 146 и 79,5 %, соответственно, одновременно с этим возникает высокая электро- и теплопроводность и снижается водопоглощение на 400 %. Аналогичные исследования проведены в работе [6], но получены более скромные результаты. При концентрации малослойного графена порядка 0,05 масс. %, по отношению к цементу, прочность на сжатие и изгиб увеличилась от 70 до 150 % и от 20 до 50 %, соответственно. Положительные результаты применения малослойного графена в качестве эффективного модификатора стимулировали ученых активизировать поиски промышленных экологически чистых технологий производства малослойного графена.

Считаем, что одной из перспективных технологий получения суспензий малослойного графена является сдвиговая эксфолиация графита в аппарате роторного типа [7]. В данной работе для получения суспензии малослойного графена использовали серийно выпускаемый высокоскоростной роторный смеситель Silverson model L5M, который состоит из цилиндрического статора с расположенными в нем ротором с лопастями и приводом вращения ротора. Цилиндрическая поверхность статора имеет многочисленные отверстия. При вращении ротора на жидкость и находящиеся в ней частицы графита действуют центробежные силы. Жидкость под действием центробежных сил выбрасывается через отверстия. Внутри статора образуется разрежение и новые объемы суспензии поступают в пространство между ротором и статором. Фактически смеситель работает как лопастной центробежный насос. В зонах между неподвижным статором и движущимися лопастями образуются зоны с большим градиентом скорости, поскольку зазор между статором и лопастями меньше 0,1 мм. По нашему мнению, именно в этих областях и происходит сдвиговая эксфолиация графита.

В работе [7] предложено три механизма, по которым может происходить эксфолиация: сдвиг в высокоградиентном потоке жидкости; за счет кавитации; при прохождении частиц через отверстия в статоре. Авторы данной работы считают, что эксфолиация в основном происходит при прохождении частицами через отверстия. Проведенные экспериментальные исследования показали, что интенсивность процесса эксфолиации практически не зависит от числа отверстий, и по результатам этих исследований разработана конструкция смесителя с подвижными лопастями, в которой лопасти скользят по внутренней поверхности статора, имеющего минимальное число отверстий, и процесс эксфолиации осуществляется за счет сдвиговых воздействий твердых поверхностей статора и лопастей на частицы. Реализация передачи сдвиговых усилий на частицы графита непосредственно от твердых поверхностей позволила почти в 1,5 раза повысить концентрацию малослойного графена в суспензии [8], по сравнению с результатами, полученными в работе [7]. Кроме этого, в работе [5] только 3 % исходного графита удалось перевести в графеновые структуры, а в [8] – не менее 6 %, но даже 6 % переработки графита в малослойный графен для промышленного производства не рентабельно.

Использование малослойного и многослойного графена в качестве модификатора пластичных смазок существенно повышает их трибологические характеристики [9, 10]. Результаты проведенных исследований процесса жидкофазной эксфолиации графита в синтетических маслах с использованием роторного смесителя с подвижными лопастями показали, что порядка 3 – 4 % графита удается преобразовать в малослойный графен. В работе [11] исследовали процесс сдвиговой эксфолиации графита в стержневой барабанной мельнице и экспериментально доказали возможность получения в ней суспензии малослойного графена.

Цель работы – исследование влияния режимных и геометрических параметров на кинетику процесса сдвиговой эксфолиации графита в стержневой барабанной мельнице.

### Оборудование и материалы

Для исследования кинетики процесса жидкофазной сдвиговой эксфолиации использовали следующее оборудование: лабораторную установку с барабаном диаметром 400 мм; установку с фарфоровыми барабанами с диаметрами 140 и 200 мм. У лабораторной установки передняя торцевая стенка выполнена из органического стекла, что позволяет проводить фото- и видеосъемку движения стержней в поперечном сечении гладкого вращающегося барабана. Скорость вращения барабана может плавно изменяться в пределах 16...100 об./мин, что составит 0,25...1,5 от критической скорости вращения барабана  $\omega_{кр}$ , которая определяется по формуле

$$\omega_{кр} = \sqrt{g/R},$$

где  $g$  – ускорение свободного падения,  $m/s^2$ ;  $R$  – внутренний радиус барабана, м.

Скорость вращения фарфорового барабана диаметром 140 мм (рис. 1) плавно изменялась в пределах 56...141 об./мин, что составило 0,5...1,25 от  $\omega_{кр}$ , но в процессе одного эксперимента оставалась постоянной. Скорость вращения фарфорового барабана диаметром 200 мм может плавно изменяться в пределах 48...120 об./мин, что составит 0,5...1,25 от  $\omega_{кр}$ .

При реализации процесса сдвиговой эксфолиации в фарфоровых барабанах использовали стальные стержни диаметрами 8, 10 и 12 мм. Длины стержней для барабанов диаметрами 140 и 200 мм равны соответственно 100 и 120 мм. В качестве основы для суспензии использовали индустриальное И-20А и синтетическое 5W-40 масла.

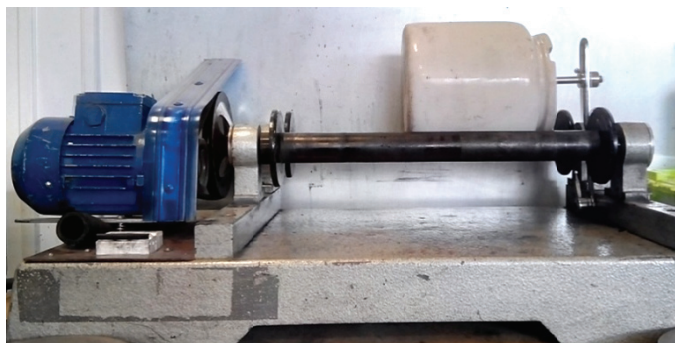


Рис. 1. Лабораторная стержневая мельница с фарфоровым барабаном

Индустриальное масло И-20А относится к дистиллятным нефтяным продуктам и предназначено для снижения трения в следующих устройствах: металлорежущие станки; прокатные станы; кузнечно-прессовое оборудование; вентиляторы; насосы; текстильные машины. Масло И-20А идеально подходит для оборудования с невысоким давлением между элементами пары трения. Модифицирование данного масла графеновыми наноструктурами существенно расширит область его применения.

Синтетические масла типа 5W-40 широко используются при эксплуатации транспортных средств. Модифицирование масел графеновыми структурами повысит, прежде всего, их трибологические характеристики и увеличит срок эксплуатации.

Для получения малослойного и многослойного графена использовали графит марки ГСМ-2.

### **Определение массовой концентрации малослойного и многослойного графена в суспензии**

Графеносодержащие пасты и суспензии широко используются при получении новых конструкционных и функциональных материалов. Для промышленной реализации новых технологий необходимо регламентировать основные характеристики графеносодержащих паст и суспензий. Массовая доля твердой фазы в графеновых пастах является одной из основных характеристик продукта. Особенностью графеновых суспензий на масляной основе, полученных методом механической сдвиговой эксфолиации является то обстоятельство, что на конечной стадии они содержат менее 1 масс. % твердой фазы.

Использование прямых методов измерения массовой доли твердой фазы в графеновых пастах не представляется возможным. Однако методом косвенных измерений данный параметр паст определяется достаточно легко, но при этом необходимо провести расчеты по определению погрешностей измерений.

В процессе анализа научно-технической литературы не обнаружены даже косвенные методы определения концентрации малослойного и многослойного графена в суспензиях на основе масел. Для водных суспензий используют метод измерений массовой доли твердой фазы, основанный на определении потери массы пробы графеновой суспензии при высушивании до постоянной массы. При этом для удаления поверхностно-активных веществ приходится разбавлять осадок чистой водой и неоднократно центрифугировать. Выделить графеновые структуры из масла значительно труднее.

Поскольку плотность масел находится в диапазоне  $800 \dots 900 \text{ кг/м}^3$ , а плотность графеновых структур порядка  $2200 \text{ кг/м}^3$ , их концентрацию в готовой суспензии (после центрифугирования и удаления осадка) можно определить экспериментально по плотности суспензии. Рассмотрим предлагаемую методику детально, на конкретном примере.

Готовую суспензию получали при следующих параметрах: концентрация графита в исходной суспензии 10 мг/мл; исходный объем суспензии 200 мл; диаметр барабана 140 мм; скорость вращения барабана  $\omega_{\text{кр}}$ ; время обработки 15 ч; центрифугирование при 5000 об./мин в течение часа; объем удаленного осадка 30 мл. Объемы шести образцов готовой суспензии отмеряли колбой объемом 25 мл, с точностью 0,04 мл. Вес образцов измеряли на электронных весах Acculab ALT-80d4 с точностью 0,0001 г. В результате обработки экспериментальных данных установлено, что плотность масла равна  $0,8369 \text{ г/см}^3$ , а плотность графеносодержащей суспензии –  $0,8428 \text{ г/см}^3$ . Исходя из этого, концентрация графеновых структур в суспензии составляет  $7,2 \pm 2,3 \text{ мг/мл}$ . Следует отметить, что это теоретически максимальные отклонения, с учетом возможных погрешностей в определении объема. При проведении практических расчетов, логично предположить,

что больший вес соответствует большему объему пробы. В этом случае концентрация равна  $7,2 \pm 0,2$  мг/мл. Контрольные проверки с использованием мерной колбы объемом  $100 \pm 0,1$  мл, показали снижение ошибки в 1,6 раза. Кроме этого проверяли точность разработанной методики с использованием графеносодержащей суспензии на основе глицерина. Контрольное определение концентрации проводили путем трехкратного центрифугирования и замены глицерина водой. После замещения глицерина водой проводили сушку в шкафу до постоянной массы. Расхождение средних значений концентраций графеновых структур, определенных традиционным методом и предлагаемым, не превышало 10 %.

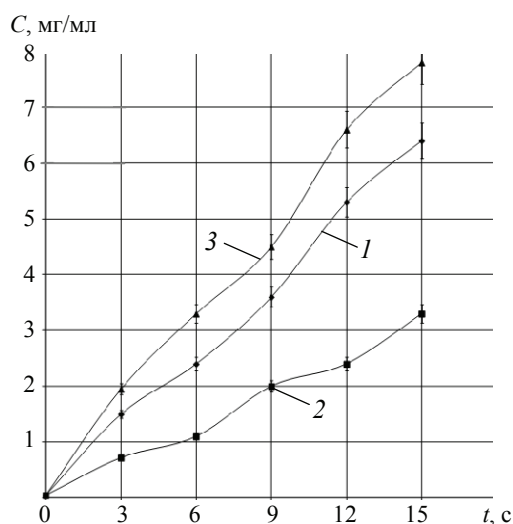
### Жидкофазная эксфолиация графита, результаты и обсуждение

Исходную суспензию готовили путем смешивания масла и порошка графита. Концентрацию графита  $C_0$  изменяли от 5 до 20 масс. %. Суспензию загружали в барабан, в котором находилось фиксированное число стержней определенного диаметра. Количество стержней (соединенных между собой) изменяли от 4 до 12. Продолжительность обработки суспензии изменяли дискретно с шагом 3 ч. После окончания процесса эксфолиации суспензию центрифугировали в течение 2 ч при скорости вращения 5000 об./мин. В зоне образования осадка центробежное ускорение было равно  $32800 \text{ м/с}^2$ . Предварительно исследовали процесс изменения концентрации графеновых структур в процессе центрифугирования. Установлено, что осаждение частиц графита, а также графеновых структур с большим количеством графеновых слоев, завершается в течение первых 0,5 – 1 ч центрифугирования. Интенсивность процесса образования графеновых структур оценивали по массовой концентрации малослойного и многослойного графена в суспензии. Концентрацию графеновых структур определяли по методике, описанной в предыдущем разделе.

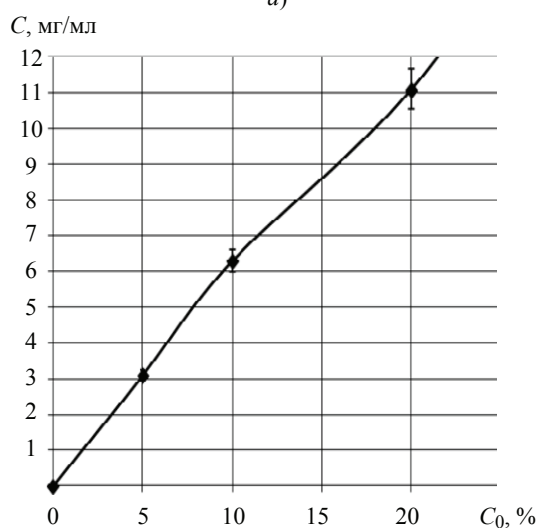
На рисунке 2, а, представлена характерная зависимость концентрации графеновых структур в суспензии  $C$ , после часа центрифугирования, от времени обработки в фарфоровом барабане с диаметром 140 мм, при разных скоростях вращения барабана. В данной серии экспериментов концентрации графита в исходной суспензии составляла 10 мг/мл. Из графиков видно, что для практических расчетов зависимости можно считать линейными. На рисунке 2, б, показана зависимость изменения концентрации графеновых структур от концентрации графита в исходной суспензии. Для практических расчетов данную зависимость можно считать линейной. В данном случае, концентрация определялась после обработки исходной суспензии в течение 15 ч, при относительной скорости вращения барабана диаметром 140 мм, равной  $\omega_{кр}$ .

Если значения концентрации умножить на объем суспензии и разделить на время обработки, то получим производительность барабанной мельницы  $Q$ , г/ч, по графеновым структурам. В результате расчета получены следующие значения производительности, г/ч: при  $\omega = 0,5\omega_{кр} - 0,038$ ;  $\omega = \omega_{кр} - 0,077$ ;  $\omega = 1,25\omega_{кр} - 0,096$ . Если построить график, то получим линейную зависимость производительности барабанной мельницы от относительной скорости ее вращения. При исходной концентрации 20 мг/мл и относительной скорости вращения барабана  $1,25 \omega_{кр}$  производительность равна 0,192 г/ч. Аналогичные зависимости получены для фарфорового барабана диаметром 200 мм. Анализ полученных данных показал, что зависимости, характеризующие интенсивность процесса от радиуса барабана, можно считать линейными.

Отметим, что одним из преимуществ стержневых барабанных мельниц является легкая масштабируемость реализуемых в них процессов. Производительность барабанной стержневой мельницы диаметром 1,4 м и длиной 1,5 м будет равна



a)



б)

**Рис. 2. Изменение концентрации графеновых структур:**

a – от времени обработки при скоростях  $\omega_{кр} - 1$ ;  $0,5 \omega_{кр} - 2$ ;  $1,25 \omega_{кр} - 3$ ;

б – от концентрации графита в исходной суспензии

370 г/ч по малослойному и многослойному графену. Учитывая то, что при модифицировании на один килограмм пластичной смазки расходуется один грамм графена, данный барабан обеспечит производство 370 килограмм смазки в час.

### Заключение

Исследовано влияние на кинетику процесса эксфолиации графита в стержневой барабанной мельнице следующих параметров: диаметра и скорости вращения барабана; концентрации графита в исходной суспензии. Установлено, что производительность мельницы прямопропорционально зависит от указанных параметров. Предложен и экспериментально проверен экспресс-метод определения концентрации малослойного и многослойного графена в масляных суспензиях. Обос-

нована перспективность использования барабанных стержневых мельниц для получения графеновых суспензий на основе органических жидкостей в производстве пластичных смазок, модифицированных графеновыми структурами.

#### *Список литературы*

1. Electric field effect in atomically thin carbon films / K. S. Novoselov [et al.] // *Science*. – 2004. – Vol. 306, No. 5696. – P. 666 – 669.
2. Towards Scale-up of Graphene Production via Non-Oxidizing Liquid Exfoliation Methods / J. Stafford [et al.] // *AIChE Journal*. – 2018. – Vol. 64, Issue 9. – P. 3246 – 3276.
3. Mechanical and Anticorrosive Properties of Graphene/Epoxy Resin Composites Coating Prepared by in-Situ Method / Z. Zhang [et al.] // *International Journal of Molecular Sciences*. – 2015. – Vol. 16, Issue 1. – P. 2239 – 2251.
4. Modification of epoxy resin by grapheme / K. A. Al-Shiblawi [et al.] // *AIP Conference Proceedings*. – 2018. – Vol. 2041. – P. 020015.
5. Ultrahigh Performance Nanoengineered Graphene–Concrete Composites for Multifunctional Applications / D. Dimov [et al.] // *Advanced Functional Materials*. – 2018. – Vol. 28, Issue 23. – Art. 1705183 (12 p.)
6. Аль-Шиблави, К. А. Модифицирование цемента малослойным графеном / К. А. Аль-Шиблави, В. Ф. Першин, Т. В. Пасько // *Вектор науки Тольяттинского гос. ун-та*. – 2018. – № 4 (46). – С. 6 – 11. doi: 10.18323/2073-5073-2018-4-6-11
7. Scalable production of large quantities of defect-free few-layer graphene by shear exfoliation in liquids / K. R. Paton [et al.] // *Nature materials*. – 2014. – Vol. 13, No. 6. – P. 624 – 630.
8. Получение малослойного графена способом жидкофазной сдвиговой эксфолиации / К. А. Аль-Шиблави [и др.] // *Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки*. – 2019. – Т. 25, № 1. – С. 143 – 154.
9. Development of environmentally safe lubricants modified by grapheme / V. F. Pershin [et al.] // *Nanotechnologies in Russia*. – 2018. – Vol. 13, No. 5-6. – P. 340 – 344.
10. Modification of Frost-Resistant Plastic Lubricants Using Few- and Multi-Layered Graphene / A. Tkachev [et al.] // *Proceedings of the 4th World Congress on Recent Advances in Nanotechnology (RAN'19), April, 2019, Rome, Italy*. – Rome, 2019. – Paper No. ICNNFC 105 (2 p.). doi: 10.11159/icnnfc19.105
11. Using a Rod Drum Mill for Graphene Masterbatch Production / G. B. Zhumagalieva [et al.] // *AIP Conference Proceedings*, 2018. – 2018. – Vol. 2041, P. 020010. doi: 10.1063/1.5079341

---

### **The Effect of Mode and Geometric Parameters on Kinetics of Liquid Phase Shift Exfoliation Process Graphite at Rod Mill**

**G. B. Zhumagalieva<sup>1</sup>, A. A. Osipov<sup>2</sup>, V. F. Pershin<sup>2</sup>**

*Department of Mechanical Engineering Technology (1),  
Zhangir Khan West - Kazakhstan Agrarian Technical University, Uralsk, Kazakhstan;  
Department of Engineering and Technology of Nanoproduction (2),  
TSTU, Tambov, Russia; pershin.home@mail.ru*

**Keywords:** graphite; concentration; low layer graphene; multi-layer graphene; suspension; exfoliation.

**Abstract:** The effect on the kinetics of the exfoliation process of graphite in a rod drum mill on the following parameters was investigated: the diameter of the drum; drum rotation speed; the concentration of graphite in the original suspension. It has been established that the productivity of a mill directly depends on the specified parameters. An express method is proposed for determining the concentration of multilayer and multilayer graphene in oil suspensions. The perspective use of drum core mills for the production of graphene suspensions based on organic liquids in the production of greases modified with graphene structures has been substantiated.

### References

1. Novoselov K.S., Geim A.K., Morozov S.V., Jiang D., Zhang Y., Dubonos S.V., Grigorieva I.V., Firsov A.A. Electric field effect in atomically thin carbon films, *Science*, 2004, vol. 306, no. 5696, pp. 666-669.
2. Stafford J., Patapas A., Uzo N., Matar O.K., Petit C. Towards Scale-up of Graphene Production via Non-Oxidizing Liquid Exfoliation Methods, *AIChE Journal*, 2018, vol. 64, issue 9, pp. 3246-3276.
3. Zhang Z., Zhang W., Li D., Sun Y., Wang Z., Hou C., Chen L., Cao Y., Liu Y. Mechanical and Anticorrosive Properties of Graphene/Epoxy Resin Composites Coating Prepared by in-Situ Method, *International Journal of Molecular Sciences*, 2015, vol. 16, issue 1, pp. 2239-2251.
4. Al-Shiblavi K.A., Pershin V.F., Jarcev V.P., Pasko T.V. Modification of epoxy resin by grapheme, *AIP Conference Proceedings*, 2018, vol. 2041, p. 020015.
5. Dimov D., Amit I., Gorrie O., Barnes M.D., Townsend N.J., Neves A.I.S., Withers F., Russo S., Craciun M.F. Ultrahigh Performance Nanoengineered Graphene-Concrete Composites for Multifunctional Applications, *Advanced Functional Materials*, 2018, vol. 28, issue 23, art. 1705183 (12 p.)
6. Al'-Shiblavi K.A., Pershin V.F., Pas'ko T.V. [Modification of cement by low-layer graphene], *Vektor nauki Tol'yattinskogo gosudarstvennogo universiteta* [Vector of science of Togliatti State University], 2018, no. 4 (46), pp. 6-11, doi: 10.18323/2073-5073-2018-4-6-11 (In Russ., abstract in Eng.)
7. Paton K.R., Varrla E., Backes C., Smith R.J., Khan U., O'Neill A., Boland C., Lotya M., Istrate O.M., King P., Higgins T., Barwich S., May P., Puczkarski P., Ahmed I., Moebius M., Pettersson H., Long E., Coelho J., O'Brien S.E., McGuire E.K., Sanchez B.M., Duesberg G.S., McEvoy N., Pennycook T.J., Downing C., Crossley A., Nicolosi V., Coleman J.N. Scalable production of large quantities of defect-free few-layer graphene by shear exfoliation in liquids, *Nature materials*, 2014, vol. 13, no. 6, pp. 624-630.
8. Al'-Shiblavi K.A., Pershin V.F., Baranov A.A., Pas'ko T.V. [Production of low-layer graphene by the method of liquid-phase shear exfoliation], *Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbPU. Yestestvennyye i inzhenernyye nauki* [Scientific and Technical Reports of SPbPU. Natural and engineering sciences], 2019, vol. 25, no. 1, pp. 143-154. (In Russ., abstract in Eng.)
9. Pershin V.F., Ovchinnikov K.A., Alsilo A.A., Stolyarov R.A., Memetov N.R. Development of environmentally safe lubricants modified by graphene, *Nanotechnology in Russia*, 2018, vol. 13, no. 5-6, pp. 340-344.
10. Tkachev A.G., Zhumagalieva G.B., Al-Hilo Z., Memetov N. R., Galunin E.V., Pershin V.F. Modification of Frost-Resistant Plastic Lubricants Using Few- and Multi-Layered Graphene, *Proceedings of the 4th World Congress on Recent Advances in Nanotechnology* (RAN'19), April, 2019, Rome, Italy, Rome, 2019, Paper no. ICNNFC 105 (2 p.), doi: 10.11159/icnnfc19.105



### **Auswirkungen von Modus und geometrischen Parametern auf die Kinetik des Prozesses des Flüssigphasenverschiebungspeelings des Graphits in der Stabtrommelmühle**

**Zusammenfassung:** Es ist der Einfluss auf die Kinetik des Prozesses des Peelings von Graphit in einer Stabtrommelmühle der folgenden Parameter untersucht: des Durchmessers der Trommel; der Rotationsgeschwindigkeit der Trommel; der Konzentration von Graphit in der Originalsuspension. Es ist festgestellt, dass die Produktivität einer Mühle direkt von den angegebenen Parametern abhängt. Zur Bestimmung der Konzentration von Kleinschicht- und Mehrschichtgraphen in Ölsuspensionen ist eine Expressmethode vorgeschlagen. Der perspektivische Einsatz der Verwendung der Stabtrommelmühle zur Herstellung von Graphen- Suspensionen auf Basis organischer Flüssigkeiten bei der Herstellung von mit Graphen- Strukturen modifizierten Fetten ist begründet worden.

---

### **Influence des paramètres modaux et géométriques sur la cinétique du procédé d'exfoliation de cisaillement du graphite en phase liquide dans le moulin à tambour**

**Résumé:** Est étudiée l'influence sur la cinétique du processus d'exfoliation du graphite dans le moulin à tambour à tige des paramètres suivants: diamètre du tambour; vitesse de rotation du tambour; concentration du graphite dans la suspension initiale. Est constaté que la productivité du moulin dépend directement des paramètres indiqués. Est proposée la méthode-express de la détermination de la concentration de graphène à faible épaisseur et multicouche dans les suspensions d'huile. Est justifiée la perspective d'utiliser des moulins à tambour pour produire des suspensions de graphène à la base des liquides organiques dans la production de graisses modifiées par des structures de graphène.

---

**Авторы:** *Жумагалиева Гаухар Болатовна* – преподаватель кафедры «Технология машиностроения», Казахстанский аграрно-технический университет имени Жангир хана, г. Уральск, Республика Казахстан; *Осинов Алексей Александрович* – кандидат технических наук, научный сотрудник кафедры «Техника и технологии производства нанопроductов»; *Першин Владимир Федорович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Техника и технологии производства нанопроductов», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

**Рецензент:** *Селиванов Юрий Тимофеевич* – доктор технических наук, доцент кафедры «Техническая механика и детали машин», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.