

DOI: 10.34031/2071-7318-2021-7-1-112-120

¹Аль-Джарах Р.А., ²Осипов А.А., ^{1,*}Першин В.Ф.¹Тамбовский государственный технический университет²АО «ЗАВКОМ»

*E-mail: pershin.home@mail.ru

РАСЧЕТ РОТОРНОГО АППАРАТА ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ГРАФЕНОСОДЕРЖАЩИХ СУСПЕНЗИЙ

Аннотация. В статье рассмотрен расчет роторного аппарата с подвижными лопастями для производства графеносодержащих суспензий, которые используются для модифицирования конструкционных и функциональных материалов с улучшенными эксплуатационными характеристиками. Дано обоснование целесообразности получения графеновых пластин методом сдвиговой эксфолиации графита непосредственно в жидкостях, которые входят в состав данных материалов. Проведены экспериментальные исследования процесса эксфолиации с тремя вариантами роторного аппарата. В первом варианте использовали роторный смеситель с большими сдвиговыми усилиями (*high-shear mixer*). Во втором варианте использовали роторный аппарат с подвижными лопастями. Указанные два варианта реализуют процесс эксфолиации графита в периодическом режиме. В третьем варианте использовали роторный аппарат с подвижными лопастями, работающий в непрерывном режиме. При работе в периодическом режиме суспензия попадает в роторный аппарат случайным образом, что не дает гарантии ее равномерной обработки. При непрерывном режиме суспензия подается насосом с регулируемой производительностью, что позволяет не только равномерно обрабатывать всю суспензию, но и контролировать время пребывания суспензии в зоне эксфолиации. Исследована кинетика процесса эксфолиации в неорганических и органических жидкостях. Показано, что наиболее эффективно процесс эксфолиации реализуется в непрерывном режиме. По результатам анализа, предложены зависимости для расчета основных режимных и геометрических параметров роторных аппаратов с подвижными лопастями, что позволяет проектировать аппараты с заданной производительностью.

Ключевые слова: графеновые пластины, сдвиговая эксфолиация, предельная концентрация, модификатор.

Введение. Результаты лабораторных исследований показали, что графеновые пластины целесообразно использовать в качестве модификатора, который улучшает эксплуатационные характеристики материалов: бетонов [1–4]; эпоксидных смол [5–7]; полимеров [8]; смазочных материалов [9–12]; суперконденсаторы и батареи [13, 14]. Промышленное использование графеновых пластин сдерживается отсутствием дешевых и экологически чистых технологий их производства.

Производственные технологии получения графеновых пластин включают: микрорасщепление; химическое осаждение из паровой фазы; жидкофазное расслоение; окисление-восстановление. Детальный анализ указанных технологий позволил установить, что существует компромисс между стоимостью и масштабируемостью, с одной стороны, и качеством графена, с другой. Это означает, что одни методы лучше подходят для приложений графена высокого качества с небольшими объемами (электроника, оптика), в то время как другие приложения, требуют большей производительности, но с менее жесткими требованиями к качеству. По возрастанию качества и цены, данные технологии следуют в следующей последовательности: окисление-восстановление

(Oxidisation-Reduction) – (Plasma) – жидкофазное расслоение графита (Liquid-Phase Exfoliation) – химическое осаждение из паровой фазы (CVD) – скотч метод (Scotch-Tape) [15].

Механическое отшелушивание было разработано Геймом и Новоселовым в 2004 году, и за исследование свойств графена им была присуждена Нобелевская премия в конце 2010 года. Это был основной метод, использованный для выделения одного монослоя графита. Его простой механизм основан на многократном отслаивании чрезвычайно ориентированного графита с использованием скотча. В 2005 году получили графеновые листы толщиной 10–100 нм с использованием Graphite Island, соединенного с кончиком микропроцессированного кремниевого кантилевера для сканирования по поверхности SiO₂/Si [16]. Полученные таким образом хлопья значительно различаются по размеру и толщине, а размер варьируется от нанометров до нескольких десятков микрометров для однослойного графена, в зависимости от подготовки использованной пластины. Однослойный графен имеет коэффициент поглощения 2 % и его можно увидеть под световым микроскопом на SiO₂/Si из-за интерференционных эффектов.

В методе CVD рост графена на поверхности происходит из-за термического разложения молекул углеводородного газа (пропана, ацетилена и метана), катализируемого поверхностью металла [17]. Переходные металлы широко используются в качестве катализаторов в процессе производства различных аллотропов углерода, таких как нанотрубки, поэтому неудивительно, что переходные металлы (Cu, Ni, Re, Ru, Ir, Co, Pt и Pd) являются основным объектом анализа при производстве графена. Переходные металлы весьма привлекательны для получения высококачественного графена большой площади и для разработки метода, который может быть интегрирован в существующую полупроводниковую промышленность. Основным недостатком методологии CVD является необходимость этапа, на котором графен переносится с металла на дополнительную подходящую подложку.

Восходящие маршруты химического синтеза имеют потенциал для крупномасштабного производства графена по доступной цене и могут привести к изменению гипотез в этой области. Источником углерода предпочтительно является сахар, содержащий 6-членную кольцевую структуру, хотя многие другие углеродистые материалы могут подвергаться дегидратации, пиролизу или окислению и использоваться для получения графена [18]. Это изобретение послужило толчком

для крупномасштабного производства недорогого графена и, следовательно, может предоставить возможности коммерциализации для реальных приложений.

Технология получения графеновых пластин методом жидкофазной сдвиговой эксфолиацией графита является одной из наиболее перспективных для массового производства графена. Началом интенсивных научных исследований данного метода послужила работа большого коллектива английских ученых [19]. Экспериментальное подтверждение перспективности использования графеносодержащих суспензий, полученных методом жидкофазной сдвиговой эксфолиацией графита было получено на примере модифицирования бетона [20]. В исследованиях [19, 20] эксфолиацию проводили в периодическом режиме, что не может обеспечить многотоннажное производство графеновой суспензии.

Цель настоящей статьи заключается в анализе перспектив промышленного производства графеносодержащих суспензий и разработка методов расчета основных режимных и геометрических параметров роторных аппаратов непрерывного действия.

Материалы и методы. В качестве исходного материала использовали природный графит ГСМ-2, показатели качества которого представлены в табл. 1.

Таблица 1

Показатели качества графита

№	Наименование продуктов	ТУ, ГОСТ	Показатели качества	Норма	Назначение
1	Графит ГСМ-2	ГОСТ 18191-78	Зольность, % Выход летучих, в том числе от флотореагентов, %	не более 0,5 не более 0,2	Исходный материал для эксфолиации

Процесс жидкофазной сдвиговой эксфолиации проводили тремя вариантами роторного аппарата. В первом варианте использовали роторный смеситель с большими сдвиговыми усилиями (high-shear mixer), как в работах [19, 20]. Во втором варианте использовали роторный аппарат с подвижными лопастями [21]. Указанные два варианта реализуют процесс эксфолиации графита в периодическом режиме. В третьем варианте использовали роторный аппарат с подвижными лопастями, работающий в непрерывном режиме [22]. На рисунке 1 показана схема роторного аппарата и механизмы расслаивания (эксфолиации) частиц графита по первому варианту.

Авторы работы [19] считают, что эксфолиация частиц графита осуществляется, в основном, за счет кавитации, случайных и краевых столкновений, которые происходят при прохождении ча-

стиц через отверстия в статоре. Экспериментальные исследования показали, что более эффективно эксфолиация происходит при сдвиговых воздействиях на частицу графита непосредственно твердыми рабочими органами (подвижными лопастями) [23].

Схемы роторных аппаратов с подвижными лопастями, которые использовались при реализации экспериментов по второму и третьему вариантам показаны на рисунке 2.

Все аппараты имели одинаковый внутренний диаметр статора – 40мм. В аппарате, показанном на рисунке 1, зазор между внутренней поверхностью статора и лопастями ротора был равен 0,1 мм, то есть такой же, как в аппаратах [19, 20]. В аппаратах (рис. 2) лопасти, под действием центробежных сил прижимались к внутренней поверхности статора.

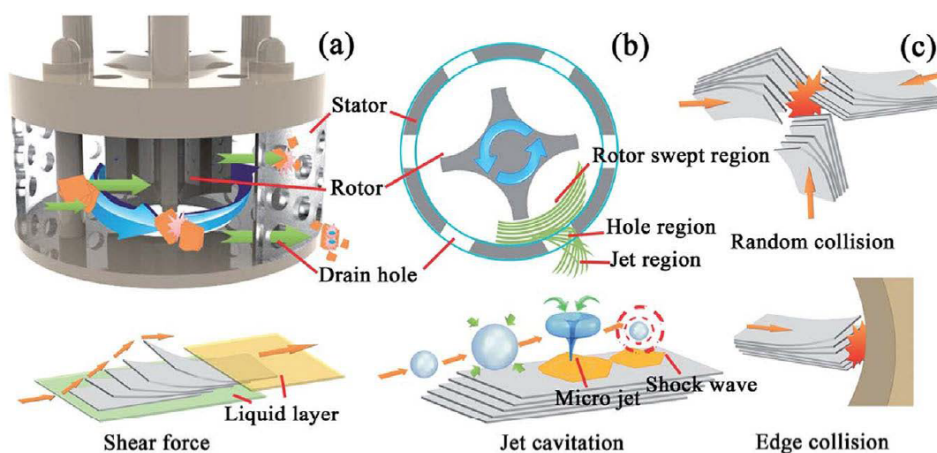


Рис. 1. Схемы роторного аппарата и механизмов расслаивания частиц графита [19]

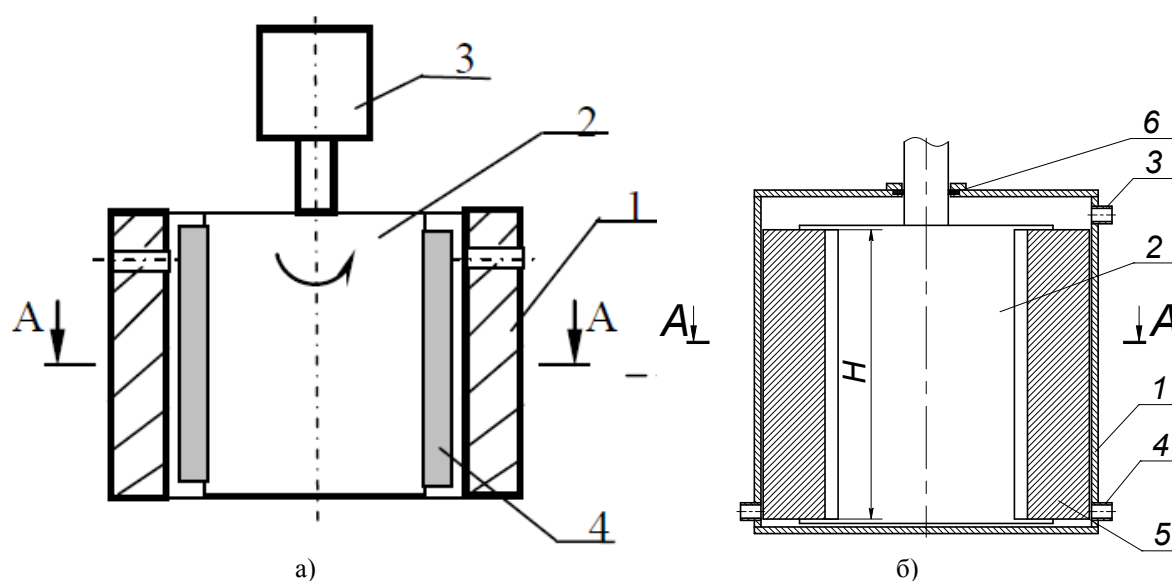


Рис. 2. Схемы роторных аппаратов с подвижными лопастями:
а – аппарат периодического действия; б – аппарат непрерывного действия

Методика проведения экспериментов.

Для определения основных зависимостей влияния режимных и геометрических параметров на интенсивность и эффективность процесса эксфолиации графита были проанализированы результаты проведенных исследований [19, 20]. По результатам исследований с роторами диаметром 12, 16 и 32 мм, было установлено, что зависимость изменения концентрации графеновых пластин в суспензии, при исходной концентрации графита 5 %, от диаметра ротора, для инженерных расчетов можно считать линейной, но при обязательном выполнении условия, что скорость сдвига больше 10^4 с^{-1} . Данное условие выполняется за счет изменения скорости вращения ротора. Для ротора с фиксированным диаметром установлено, что зависимость изменения концентрации графеновых пластин в суспензии от времени обработки, можно считать линейной. Следует отметить, что указанные зависимости про-

верены экспериментально только до концентрации графеновых пластин 0,07 мг/мл, поскольку большей концентрации на роторном аппарате данной конструкции не получено.

При проведении экспериментов по эксфолиации в периодическом режиме [19, 22] в качестве исходной суспензии использовали смесь порошка графита и воды с концентрациями графита 5 и 10 %. Объем исходной суспензии во всех опытах был равен 5 литров. Для предотвращения агломерации графеновых пластин в суспензию добавляли поверхностно активные вещества (N-метил 2 пирролидон, пластификатор СП-1), в количестве 1-3 грамма на литр. Частота вращения ротора изменялась от 5000 до 15000 об/мин.

Исходную суспензию заливали в емкость, устанавливали внутрь емкости роторный аппарат и проводили процесс эксфолиации. Каждые 5 минут из емкости отбирали 3 пробы объемом 150 мм, центрифугировали при параметрах, указан-

ных в работах [19, 20], из фильтрата формировали пробы объемом 100 мл и определяли концентрацию графеновых пластин.

При исследовании процесса эксфолиации в непрерывном режиме исходную суспензию заливали в емкость и насосом подавали во входной патрубке 3 (рис. 2б). Из патрубков 4 обработанная суспензия выливалась в дополнительную емкость. После завершения цикла обработки суспензию из дополнительной емкости переливали в

емкость для исходной суспензии и повторяли цикл обработки. Пробы для анализа отбирали и подготавливали, как было описано выше.

На рисунке 3 показаны зависимости изменения концентрации графеновых пластин в суспензии при исходной концентрации графита 5 %, внутренним диаметром статора 40 мм, частота вращения ротора 5000 об/мин.

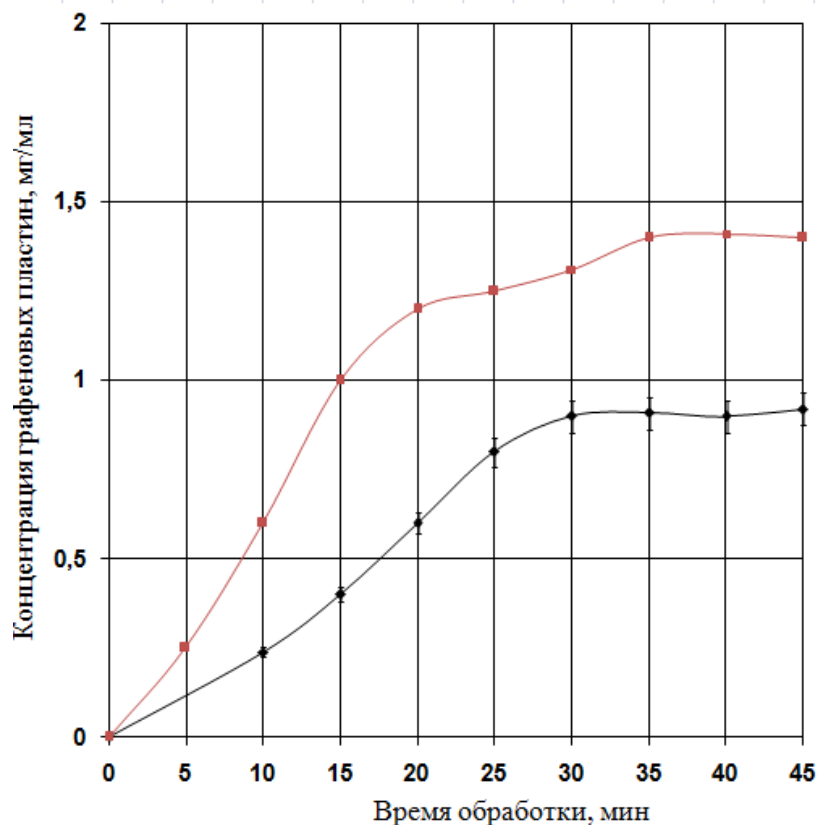


Рис. 3. Зависимости изменения концентрации графеновых пластин в суспензии: нижняя кривая – роторный аппарат [19]; верхняя кривая – роторный аппарат [21]

Из графиков видно, что при использовании аппарата с подвижными лопастями не только интенсивность процесса эксфолиации, но и предельная концентрация графеновых пластин в суспензии выше на 55 % (0,9 и 1,4 мг/мл).

На рисунке 4 показана зависимость изменения концентрации графеновых пластин в суспензии при работе роторного аппарата в непрерывном режиме.

При работе в непрерывном режиме интенсивность процесса выше, поскольку предельная концентрация графеновых пластин в суспензии достигается за 25 минут, а при работе в периодическом режиме за 35 минут. Кроме этого, при работе в непрерывном режиме предельная концентрация графеновых пластин на 7 % выше, чем при периодическом режиме. Увеличение интенсивности процесса и предельной концентрации,

по нашему мнению, можно объяснить тем, что при непрерывном режиме обеспечивается равномерная обработка суспензии, поскольку на каждом цикле весь объем суспензии проходит через роторный аппарат. Для набора статистических данных по каждому варианту эксфолиации проводились по 10 экспериментов. Таким образом, каждая точка на графиках это среднее значение концентрации 30 опытов. Следует особо отметить, что отклонения численных значений концентрации графеновых частиц от средних значений при непрерывном процессе не более 5 %, а при периодическом не менее 10 %. Это говорит о том, что процесс эксфолиации графита в непрерывном режиме осуществляется более стабильно, чем в периодическом режиме.

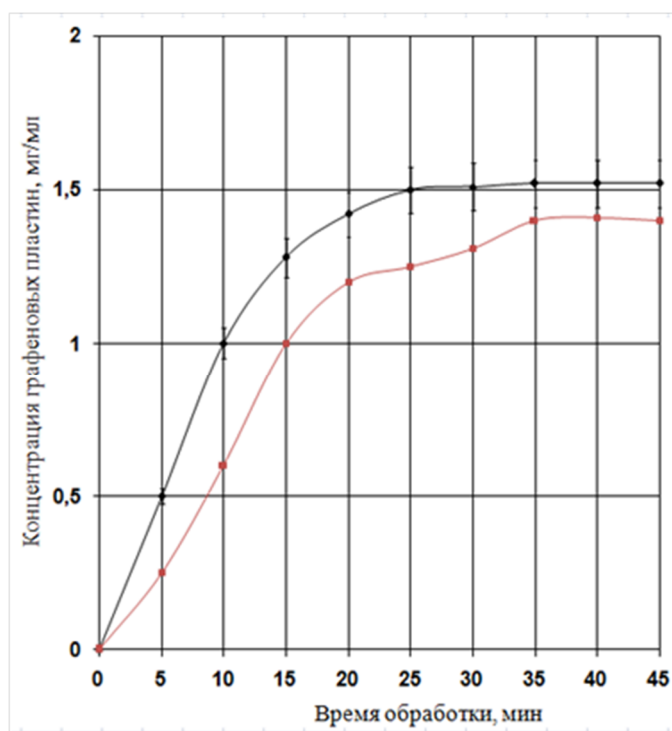


Рис. 4. Зависимости изменения концентрации графеновых пластинок в суспензии: нижняя кривая – роторный аппарат, работающий в периодическом режиме [21]; верхняя кривая – роторный аппарат, работающий в непрерывном режиме [22]

Расчет основных геометрических и режимных параметров. Расчет роторного аппарата, работающего в непрерывном режиме [22], имеет ряд принципиальных отличий от расчета аппаратов, работающих в периодическом режиме [19–21]. При работе аппаратов, работающих в периодическом режиме, объем суспензии, проходящей через зону между статором и ротором, зависит от многих параметров (диаметры статора и ротора, скорость вращения ротора, диаметр и число отверстий в статоре и другие). Более того, численное значение длины пути, пройденного отдельной частицей в указанной зоне, носит случайный характер, поскольку невозможно определить через какое отверстие частица покинет эту зону. При работе в непрерывном режиме [22] объемная производительность задается насосом, который подает суспензию в зону между статором и ротором. Кроме этого каждая частица проходит путь от верхнего отверстия, в которое подается суспензия по винтовой линии до нижнего отверстия, через которое суспензия выходит из аппарата (рис. 2б). Таким образом, в данном случае достаточно просто определять время, за которое осуществляется один цикл обработки суспензии определенного объема и среднюю длину пути частиц в зоне между статором и ротором. Результаты многочисленных экспериментов показали, что концентрация графеновых пластинок в суспензии прямо пропорциональна: концентрации графита в исходной суспензии; длине пути частицы в зоне между статором и ротором за

один цикл обработки; числу циклов обработки. Определить аналитически изменение концентрации графеновых пластинок за один цикл обработки пока не представляется возможным, поэтому необходимо определить это значение на лабораторной установке и осуществить масштабный переход к промышленному аппарату.

Определим производительность промышленного аппарата с фиксированными геометрическими и режимными параметрами, если известна концентрация графеновых пластинок за один цикл обработки на лабораторной установке C_{IL} . Пусть параметры промышленного аппарата равны: R_S – радиус статора, м; R_R – радиус ротора, м; H_R – высота ротора, м; ω – угловая скорость вращения ротора, c^{-1} ; Q_S – объемная производительность насоса, подающего суспензию в аппарат, m^3/c ; V_S – объем обрабатываемой суспензии. Поскольку в начале процесса концентрация графеновых пластинок в суспензии увеличивается прямо пропорционально числу циклов обработки, определим основные параметры одного цикла обработки.

Длина пути, пройденного частицей в зоне эксфолиации за один цикл обработки:

$$L_I = 2\pi R_S \omega \tau_E, \quad (1)$$

где τ_E – время пребывания частицы в зоне эксфолиации, с.

Время τ_E равно:

$$\tau_E = V_{RS} / Q_S = \pi(R_S^2 - R_R^2) H_R / Q_S, \quad (2)$$

где V_{RS} – объем между статором и ротором, m^3 .

После подстановки (2) в (1) получаем:

$$L_1 = 2\pi^2 R_S \omega (R_S^2 - R_R^2) H_R / Q_S \quad (3)$$

Концентрация графеновых пластин в суспензии после одного цикла обработки равна:

$$C_1 = C_{1L} (L_1 / L_{1L}), \quad (4)$$

где C_1 – концентрация после одного цикла обработки, а нижний индекс L относится к лабораторной установке.

Время одного цикла обработки τ_1 равно:

$$C(\tau) = C_{1L} [(R_S \omega (R_S^2 - R_R^2) H_R / Q_S / R_{SL} \omega_L (R_{SL}^2 - R_{RL}^2) H_{RL} / Q_{SL})] \tau Q_S C_0 / V_S C_{0L}, \quad (8)$$

где C_{1L} – концентрация графеновых пластин в суспензии после одного цикла обработки в лабораторной установке, C_{0L} и C_0 – концентрации графита в исходной суспензии лабораторной и промышленной установки, соответственно.

В зависимость (8) входят все основные параметры проектируемой установки.

Производительность установки, в пересчете на сухие графеновые пластины равна:

$$Q_G = V C(\tau) / \tau.$$

Выводы. Получены аналитические зависимости для расчета основных геометрических и режимных параметров роторного аппарата для получения графеносодержащих суспензий методом жидкофазной сдвиговой эксфолиации графита. Эти зависимости можно использовать для расчета производительности действующего аппарата при изменении режимных параметров, а также для расчета геометрических и режимных параметров проектируемого аппарата с заданной производительностью по сухим графеновым пластинам. При проектировании нового аппарата расчет производится методом последовательных приближений с изменением параметров в рекомендуемых диапазонах. Например, концентрацию графита в исходной суспензии можно изменять в диапазоне от 5 до 20 мас. %. Зазор между статором и ротором рекомендуется принимать от 1 до 3 мм.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Lavagna L., Massella D., Priola E., Pavese M. Relationship between oxygen content of graphene and mechanical properties of cement-based composites // *Cement and Concrete Composites*. 2021. Vol. 115. 103851. doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.10385
2. Qureshi T. S., Panesar D. K. Nano reinforced cement paste composite with functionalized graphene and pristine graphene nanoplatelets // *Composites Part B: Engineering*. 2020. Vol. 197. P. 108063. doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.108063
3. Pei C., Ueda T., Zhu J. Investigation of the effectiveness of graphene/polyvinyl alcohol on the

$$\tau_1 = V_S / Q_S. \quad (5)$$

Число циклов обработки N за время τ равно:

$$N = \tau / \tau_1. \quad (6)$$

Концентрация графеновых пластин в суспензии $C(\tau)$ к моменту времени τ равно:

$$C(\tau) = C_1 (\tau_1 / \tau_{1L})^N. \quad (7)$$

После подстановки (3-6) в (7) получаем:

mechanical and electrical properties of cement compos // *Materials and Structures*. 2020. Vol. 53 (3). doi.org/10.1617/s11527-020-01508-6

4. Ho V.D., Ng C.T., Coghlan C.J., Goodwin A., Mc Guckin C., Ozbakkaloglu T., Losic D. Electrochemically produced graphene with ultra large particles enhances mechanical properties of Portland cement mortar // *Construction and Building Materials*. 2020. Vol. 234. 117403. doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117403

5. Naeem M., Kuan H., Michelmore A., Meng Q., Qiu A., Aakyir M., Losic D., Zhu S., Ma J. A new method for preparation of functionalized graphene and its epoxy nanocomposites // *Composites Part B: Engineering*. 2020. Vol. 196. 108096. doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.108096

6. Duan W., Chen Y., Ma J., Wang W., Cheng J., Zhang J. High-performance graphene reinforced epoxy nanocomposites using benzyl glycidyl ether as a dispersant and surface modifier // *Composites Part B: Engineering*. 2020. Vol. 189. 107878. doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.107878

7. Zhang Z., Zhang W., Li D., Sun Y. Mechanical and Anticorrosive Properties of Graphene/Epoxy Resin Composites Coating Prepared by in-Situ Method // *International Journal of Molecular Sciences*. 2015. Vol. 16. Pp. 2239–2251.

8. Ponnamma D., Yin Y., Salim N., Parameswaranpillai J., Thomas S., Hameed N. Recent progress and multifunctional applications of 3D printed graphene nanocomposites // *Composites Part B: Engineering*. 2021. Vol. 204. 108493. doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.108493

9. Dollekamp E., Bampoulis P., Siekman M.H., Kooij S.E., Zandvliet H. J. W. Tuning the Friction of Graphene on Mica by Alcohol Intercalation // *Langmuir*. 2019. № 14. Pp. 4886–4892. doi.org/10.1021/acs.langmuir.9b00471

10. Wang H., Zhang Y., Yin Z., Su Y., Zhang Y., Cao J. Experimental research on tribological properties of liquid phase exfoliated graphene as an additive in -30 SAE 10W lubricating oil // *Tribology International*. 2019. Vol. 135. Pp. 29–37. doi.org/10.1016/j.triboint.2019.02.030

11. Zheng F., Duan F. Atomistic mechanism of the weakened wear resistance of few-layer graphene

induced by point defects // Tribology International. 2019. Vol. 134. Pp. 87–92. doi.org/10.1016/j.triboint.2019.01.035

12. Missala T., Szewczyk R., Winiarski W. Study on Tribological Properties of Lubricating Grease with Additive of Graphene // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2015. № 352. Pp. 181–187. doi: 10.1007/978-3-319-15835-8_20

13. Bellani S., Petroni E., Castillo A. E. Del Rio, Curreli N., Martín-García B., Oropesa-Nuñez R., Prato M., Bonaccorso F. Scalable Production of Graphene Inks via Wet-Jet Milling Exfoliation for Screen-Printed Micro-Supercapacitors // Advanced Functional Materials. 2019. Vol. 29. 1807659. doi.org/10.1002/adfm.201807659

14. Xu L., Lv W., Shi K., Xiao S., You C., He Y., Kang F., Yang Q. Holey graphenes as the conductive additives for LiFePO₄ batteries with an excellent rate performance // Carbon 2019. Vol. 149. Pp. 257–262. doi.org/10.1016/j.carbon.2019.04.025

15. Kumar P., Wani M.F. Synthesis and tribological properties of graphene: A review // Journal Tribologi 2017. №13. Pp. 36–71.

16. Zhang Y., Small J.P., Pontius W.V., Kim P. Fabrication and electric-field-dependent transport measurements of mesoscopic graphite devices // Applied Physics Letters. 2005. №86(7). 073104.

17. Mattevi C., Kim H., Chhowalla M. A review of chemical vapour deposition of graphene on copper // Journal of Materials Chemistry. 2011. №21(10). Pp. 3324–3334.

18. Shankman R. S. U.S. Patent No. 9,023,308. 2015. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.

19. 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. Pp. 624–630

20. Dimov D., Amit I., Gorrie O., Barnes M. D., Townsend N. J., Neves Ana I. S., Withers F., Russo S., Craciun M.F. Ultrahigh performance nanoengineered graphene–concrete composites for multifunctional applications // Advanced Functional Materials. 2018. 1705183.

21. Пат. 2720684, Российская Федерация, МПК С 01 В 32/186. Способ получения графено-содержащих суспензий и устройство для его реализации / В.Ф. Першин, К.А.Х. Аль-Шиблави, А.М.Р. Аль-Машхадани, В.Н. Артемов, А.М. Воробьев, С.А. Киселев, Д.Д. Мелехин, Н.Р. Меметов, А.А. Осипов, А.А. Пасько, А.Г. Ткачев; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО "ТГТУ". № .2019101764; заявл. 13.03.2019; опубл. 12.05.2020, Бюл. №14. 10 с.

22. Пат. 2737925, Российская Федерация, МПК С 01 В 32/186. Способ получения графено-содержащих суспензий эксфолиацией графита и устройство для его реализации / В.Ф. Першин, Р.А. Аль-Джарах, В. Мансур, А.А. Баранов, А.М. Воробьев, Д.Д. Мелехин, Н.Р. Меметов, А.А. Осипов, А.А. Пасько, А.Г. Ткачев; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО "ТГТУ". № .201914021; заявл. 12.12.2019; опубл. 04.12.2020, Бюл. №34. 10 с. Патентообладатель ФГБОУ ВО "ТГТУ". 2019. Бюл. №34. 10 с.

23. Аль-Шиблави К. А. Пасько А. А., Першин В. Ф. Моделирование процесса получения графеновых структур жидкофазной сдвиговой эксфолиацией графита // Вестник ТГТУ. 2018. Т. 24. № 4. С. 717–726.

Информация об авторах

Аль-Джарах Руаа Амер, аспирант. E-mail: ruaa.aljarah@gmail.com. Тамбовский государственный технический университет. Россия, 392000, Тамбов, ул. Советская, д. 106.

Осипов Алексей Александрович, кандидат технических наук, начальник цеха. E-mail: aleksey.osipov@mail.ru. АО «ЗАВКОМ». Россия, 392000, Тамбов, ул. Советская, д. 51.

Першин Владимир Федорович, доктор технических наук, профессор кафедры техники и технологии производства нанопродуктов. E-mail: pershin.home@mail.ru. Тамбовский государственный технический университет. Россия, 392000, Тамбов, ул. Советская, д. 106.

Поступила 13.08.2021 г.

© Аль-Джарах Р.А., Осипов А.А., Першин В.Ф., 2022

¹*Al-Jarah R.A.*, ²*Osipov A.A.*, ^{1,*}*Pershin V.F.*¹Tambov State Technical University²JSC "ZAVKOM"

*E-mail: pershin.home@mail.ru

CALCULATION OF ROTARY APPARATUS FOR PRODUCTION OF GRAPHENE-CONTAINING SUSPENSIONS

Abstract. *The calculation of a rotary apparatus with movable blades for the production of graphene-containing suspensions is considered. It is used to modify structural and functional materials with improved performance characteristics. The rationale is given for the expediency of obtaining graphene plates by the method of shear exfoliation of graphite directly in liquids that are part of these materials. Experimental studies of the exfoliation process with three variants of the rotary apparatus have been carried out. In the first variant, a high-shear mixer is used. In the second variant, there is a rotary apparatus with movable blades. These two options implement the process of exfoliation of graphite in a batch mode. In the third variant, a rotary apparatus with movable blades operating in a continuous mode is used. When operating in a batch mode, the suspension enters the rotary apparatus in a random manner. It does not guarantee its uniform processing. In continuous mode, the suspension is supplied by a pump with an adjustable capacity. It allows the uniformly treating the entire suspension and controlling the residence time of the suspension in the exfoliation zone. The kinetics of the exfoliation process in inorganic and organic liquids has been investigated. The exfoliation process is carried out most effectively in a continuous mode. In result, dependences are proposed for calculating the main operating and geometric parameters of rotary apparatus with movable blades*

Keywords: *graphene plates, shear exfoliation, limiting concentration, concrete, epoxy resin, plastic lubricant, modifier.*

REFERENCES

1. Lavagna L., Massella D., Priola E., Pavese M. Relationship between oxygen content of graphene and mechanical properties of cement-based composites. *Cement and Concrete Composites*. 2021. Vol. 115. 103851. doi.org/10.1016/j.cemcomp.2020.10385

2. Qureshi T.S., Panesar D.K. Nano reinforced cement paste composite with functionalized graphene and pristine graphene nanoplatelets. *Composites Part B: Engineering*. 2020. Vol. 197. 108063. doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.108063

3. Pei C., Ueda T., Zhu J. Investigation of the effectiveness of graphene/polyvinyl alcohol on the mechanical and electrical properties of cement compos. *Materials and Structures*. 2020. Vol. 53 (3). doi.org/10.1617/s11527-020-01508-6

4. Ho V.D., Ng C.T., Coghlan C.J., Goodwin A., Mc Guckin C., Ozbakkaloglu T., Losic D. Electrochemically produced graphene with ultra large particles enhances mechanical properties of Portland cement mortar. *Construction and Building Materials*. 2020. Vol. 234. 117403. doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117403

5. Naeem M., Kuan H., Michelmore A., Meng Q., Qiu A., Aakyiir M., Losic D., Zhu S., Ma J. A new method for preparation of functionalized graphene and its epoxy nanocomposites. *Composites Part B: Engineering*. 2020. Vol. 196. 108096. doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.108096

6. Duan W., Chen Y., Ma J., Wang W., Cheng J., Zhang J. High-performance graphene reinforced epoxy nanocomposites using benzyl glycidyl ether

as a dispersant and surface modifier. *Composites Part B: Engineering*. 2020. Vol. 189. 107878. doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.107878

7. Zhang Z., Zhang W., Li D., Sun Y. Mechanical and Anticorrosive Properties of Graphene/Epoxy Resin Composites Coating Prepared by in-Situ Method. *International Journal of Molecular Sciences*. 2015. Vol. 16. Pp. 2239–2251.

8. Ponnammma D., Yin Y., Salim N., Parameswaranpillai J., Thomas S., Hameed N. Recent progress and multifunctional applications of 3D printed graphene nanocomposites. *Composites Part B: Engineering*. 2021. Vol. 204. 108493. doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.108493

9. Dollekamp E., Bampoulis P., Siekman M.H., Kooij S.E., Zandvliet H.J.W. Tuning the Friction of Graphene on Mica by Alcohol Intercalation. *Langmuir*. 2019. No. 14. Pp. 4886–4892. doi.org/10.1021/acs.langmuir.9b00471

10. Wang H., Zhang Y., Yin Z., Su Y., Zhang Y., Cao J. Experimental research on tribological properties of liquid phase exfoliated graphene as an additive in -30 SAE 10W lubricating oil. *Tribology International*. 2019. Vol. 135. Pp. 29–37. doi.org/10.1016/j.triboint.2019.02.030

11. Zheng F., Duan F. Atomistic mechanism of the weakened wear resistance of few-layer graphene induced by point defects. *Tribology International*. 2019. Vol. 134. Pp. 87–92. doi.org/10.1016/j.triboint.2019.01.035

12. Missala T., Szewczyk R., Winiarski W. Study on Tribological Properties of Lubricating

Grease with Additive of Graphene. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2015. No. 352. Pp.181–187. doi: 10.1007/978-3-319-15835-8_20

13. Bellani S., Petroni E., Castillo A. E. Del Rio, Curreli N., Martín-García B., Oropesa-Nuñez R., Prato M., Bonaccorso F. Scalable Production of Graphene Inks via Wet-Jet Milling Exfoliation for Screen-Printed Micro-Supercapacitors. *Advanced Functional Materials*. 2019. Vol. 29. 1807659. doi.org/10.1002/adfm.201807659

14. Xu L., Lv W., Shi K., Xiao S., You C., He Y., Kang F., Yang Q. Holey graphenes as the conductive additives for LiFePO₄ batteries with an excellent rate performance. *Carbon* 2019. Vol. 149. Pp. 257–262. doi.org/10.1016/j.carbon.2019.04.025

15. Kumar P., Wani M.F. Synthesis and tribological properties of graphene: A review. *Journal Tribologi* 2017. No. 13. Pp. 36–71.

16. Zhang Y., Small J. P., Pontius W. V., Kim P. Fabrication and electric-field-dependent transport measurements of mesoscopic graphite devices. *Applied Physics Letters*. 2005. No. 86(7). 073104.

17. Mattevi C., Kim H., Chhowalla M. A review of chemical vapour deposition of graphene on copper. *Journal of Materials Chemistry*. 2011. No. 21(10). Pp. 3324–3334.

18. Shankman R. S. U.S. Patent No. 9,023,308. 2015. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.

19. Paton K.R., Varrla E., Backes C., Smith R.J., Khan U., O'Neill A., Boland C., Lotya M., Isstrate 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. Pp. 624–630

20. Dimov D., Amit I., Gorrie O., Barnes M. D., Townsend N. J., Neves Ana I. S., Withers F., Russo S., Craciun M.F. Ultrahigh performance nanoengineered graphene–concrete composites for multifunctional applications. *Advanced Functional Materials*. 2018. 1705183.

21. Pershin V.F., Al-Shiblavi K.A.Kh., Al-Mashhadani A.M.R., Artemov V.N., Vorobiev A.M., Kiselev S.A., Melekhin D.D., Memetov N.R., Osipov A.A., Pasko A.A., Tkachev A.G. A method of obtaining graphene-containing suspensions and a device for its implementation. Patent RF, no. 2720684, 2019.

22. Pershin V.F., Al-Jahar R.A., Mansur V., Baranov A.A., Vorobiev A.M., Melekhin D.D., Memetov N.R., Osipov A.A., Pasko A.A., Tkachev A.G. A method of obtaining graphene-containing suspensions by exfoliation of graphite and a device for its implementation. Patent RF, no. 2737925, 2019.

23. Al-Shiblavi K.A., Pasko A.A., Pershin V. F. Modeling of the process of obtaining graphene structures by liquid-phase shear exfoliation of graphite [Modelirovanie processa polucheniya grafenovykh struktur zhidkofaznoj sdvigovoj eksfoliaciej grafita]. *Bulletin of TSTU*. 2018. Vol. 24. No. 4. Pp. 717–726 (rus)

Information about the authors

Al-Jarah Ruaa Amer, PhD student. E-mail: ruaa.aljarah@gmail.com. Tambov State Technical university. Russia, 392000, Tambov, st. Sovetskaya, 106

Osipov, Aleksey A. candidate of technical sciences, shop manager. E-mail: aleksey.osipov@mail.ru. JSC "ZAVKOM". Russia, 392000, Tambov, st. Sovetskaya, 51

Pershin, Vladimir F. Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Engineering and Technology for the Production of Nanoproducts. E-mail: pershin.home@mail.ru. Tambov State Technical University. Russia, 392000, Tambov, st. Sovetskaya, 106

Received 13.08.2021

Для цитирования:

Аль-Джарах Р.А., Осипов А.А., Першин В.Ф. Расчет роторного аппарата для производства графеносодержащих суспензий // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2022. № 1. С. 112–120. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-7-1-112-120

For citation:

Al-Jarah R.A., Osipov A.A., Pershin V.F. Calculation of rotary apparatus for production of graphene-containing suspensions. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2022. No. 1. Pp. 112–120. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-7-1-112-120