

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА СМЕШИВАНИЯ В ДИСКОВОМ ГОМОГЕНИЗАТОРЕ-ДИСПЕРГАТОРЕ

**З. А. Алхило, А. А. Баранов, В. Мансур,
Е. Н. Туголуков, А. А. Пасько, В. Ф. Першин**

*Кафедра «Техника и технологии производства нанопродуктов»,
pershin.home@mail.ru; ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия*

Ключевые слова: графит; малослойный графен; многослойный графен; смазка; смешивание; цепи Маркова.

Аннотация: Исследовано движение вязкой жидкости в малом зазоре между неподвижным и вращающимся дисками и дано математическое описание для плоских и ступенчатых дисков. На основе математического аппарата случайных марковских процессов, дискретных в пространстве и времени, создана модель процесса смешивания пластичной смазки с графеновыми пластинами в роторном гомогенизаторе-диспергаторе. Декомпозиция процесса и рассмотрение отдельно процессов смешивания в радиальном и окружном направлениях позволило оценить их интенсивность и выработать рекомендации для перехода от лабораторных установок к промышленным аппаратам.

Введение

Новый интерес к материалам, которые могут быть получены из графита, возник как только был получен графен и определены его уникальные физико-механические характеристики. Экспериментально установлено, что один слой графена, выращенного на стали, выдерживает 6 400 циклов скольжения, тогда как малослойный графен (состоящий из 3–4 слоев) выдерживает 47 000 циклов. Кроме того, показано, что данные графеновые слои полностью останавливают износ, несмотря на сложные условия скольжения, включая высокие контактные давления ($\approx 0,5$ ГПа), которые обычно наблюдаются в мелкомасштабных испытаниях [1]. В работе [2] графен готовили методом жидкофазной эксфолиации графита, а затем методом микрофлюидизации его равномерно диспергировали в смазочном масле SAE 10W-30. Смазочные масла без графена и с различными его концентрациями испытаны на трибометре со штифтом на диске при высоком удельном давлении 10 МПа и низкой линейной скорости 0,3 м/с. После испытаний царапины на дисках наблюдали с помощью сканирующего электронного микроскопа (SEM) и трехмерной 3D-системы поверхностной метрологии. Масло с 0,05 масс.% графена показало минимальный коэффициент трения, самую низкую удельную износостойкость и малейшее царапание. Результаты выявили, что графен, диспергированный в масле SAE 10W-30 с оптимальной концентрацией, улучшил антифрикционные и противоизносные характеристики.

В работе [3] отмечается, что при использовании масла с графеновыми пластинами обычно не достигается желаемой смазывающей способности из-за плохой совместимости поверхности раздела графена и базового масла, особенно в жестких условиях трения. Для изготовления модифицированного фосфата гра-

фенового геля применен простой метод механического измельчения. Приготовленный гель продемонстрировал хорошую термостабильность, дисперсность и трибологические свойства даже в условиях высоких нагрузки и температуры. Анализ поверхности трения показал наличие многоплочной структуры, которая обладает хорошим синергетическим смазывающим эффектом, тем самым улучшая трибологические характеристики.

Результаты трибологических испытаний показали, что многослойный графен способен значительно снизить износ и коэффициент трения (COF) стали 440С во время начального режима скольжения и в условиях низкой нагрузки [4]. В частности, COF был уменьшен с 1,0 (для стали без покрытия) до 0,15 – для стали, покрытой низкой концентрацией графеновых хлопьев. Такие низкие значения COF сохранялись в течение тысяч проходов скольжения, даже если слои графена, образованные на поверхностях скольжения, не были непрерывными или непрерывно пополняемыми; содержали несколько листов графена. Скорость износа стальных испытательных пар также уменьшалась (на два порядка), несмотря на очень спорадическую и тонкую природу графеновых слоев. Очевидно, низкое трение и уменьшение износа обусловлено тем, что графен, как двумерный материал, легко сдвигается на поверхности скользящего контакта и, следовательно, обеспечивает низкое трение.

В обзоре [5] представлены результаты определения коэффициента трения смазок, модифицированных углеродными наноматериалами, в том числе графеновыми пластинами. Проведенный анализ показал, что концентрации модификатора изменялись от 0,03 до 3 %, а коэффициент трения – от 0,08 до 0,18. Такие широкие диапазоны обусловлены двумя основными причинами:

- отсутствует четкий контроль за качеством графеновых пластин (числом графеновых слоев, латеральными размерами, наличием дефектов и т.д.);
- не контролируется равномерность распределения графеновых пластин по объему смазки.

Использование малослойного и многослойного графенов в качестве модификатора пластичных смазок существенно повышает их трибологические характеристики [6, 7].

При переходе от лабораторных способов модифицирования смазок графеновыми пластинами к промышленным технологиям, необходимо прогнозировать не только качество графеновых пластин, но и неоднородность смеси данных пластин со смазкой. Рассмотрим один из вариантов решения второй проблемы, путем моделирования процесса смешивания пластичной смазки с графеновыми пластинами.

Объект моделирования

Процесс смешивания пластичной смазки с графеновыми пластинами осуществляется в дисковом гомогенизаторе-диспергаторе. Ранее предложена экологически чистая и безотходная технология производства графеносодержащих масляных суспензий и модифицирования ими пластичных смазок [8]. В соответствии с данной технологией, графеносодержащая масляная суспензия производится из графита, предварительно механоактивированного в стержневой барабанной мельнице в роторном аппарате с подвижными лопастями. Данная суспензия проходит через фильтр грубой очистки для удаления частиц графита и фильтр тонкой очистки для получения масляного концентрата графеновых пластин. Финишной операцией такой технологии является операция смешивания пластичной смазки с графеновым концентратом в роторном гомогенизаторе-диспергаторе со ступенчатым диском (рис. 1).

Гомогенизатор состоит из ступенчатого диска (ротора) 1, статора 2, патрубка для подачи смеси 3. Смешивание вязкой жидкости с графеновыми пластинами осуществляется следующим образом. Пластическую смазку с графеновым концентратом

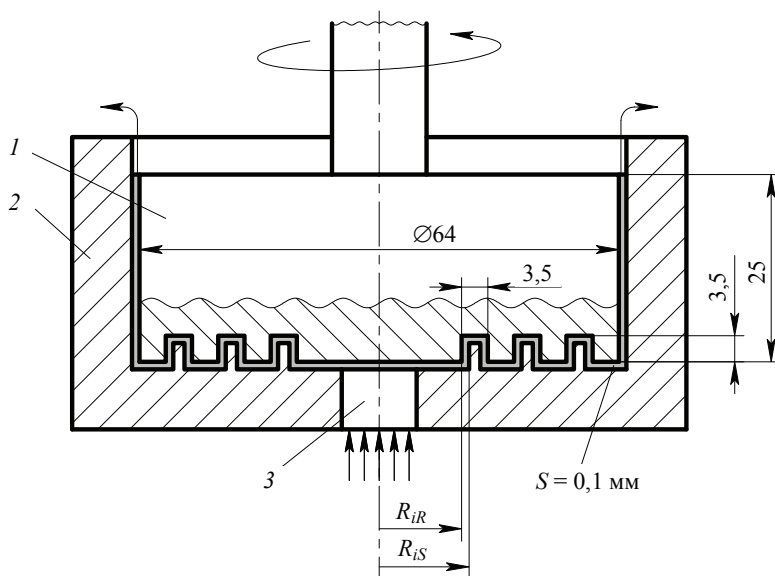


Рис. 1. Схема гомогенизатора со ступенчатым диском

предварительно смешивают с помощью лабораторной лопастной мешалки. Содержание графеновых пластин не превышает 1 масс.%. Насосом смесь подают в патрубок 3 при вращающемся диске 1. По сравнению с плоским диском в данном случае добавились вертикальные участки, на которых смесь движется по винтовым траекториям.

Таким образом, объектом моделирования является процесс смешивания пластичной смазки с графеновыми пластинами при совместном движении в малом зазоре между неподвижным и вращающимся ступенчатыми дисками. Прежде чем перейти к моделированию процесса, необходимо рассмотреть движение вязкой жидкости в указанном малом зазоре.

Движение вязкой жидкости в малом зазоре между неподвижным и вращающимся дисками

При математическом описании движения вязкой жидкости, как правило, на основе общих уравнений сохранения движения, массы и энергии записываются дифференциальные уравнения течения. Далее, используя постоянство температуры жидкости, исходная система преобразуется в систему уравнений, состоящую из уравнений неразрывности в стационарной постановке и уравнения Навье–Стокса.

В рассматриваемой конструкции движение вязкой жидкости происходит на горизонтальных и вертикальных участках. На горизонтальных участках движение можно рассматривать по классической схеме зазора между неподвижной и движущейся плоскими пластинами.

В работе [9] дано математическое описание движения вязкой жидкости между плоскими дисками и рассмотрена схема, представленная на рис. 2.

Для нахождения траектории движения элементарного объема записаны следующие дифференциальные уравнения:

$$\frac{dr(\tau)}{d\tau} = \frac{V}{2\pi r(\tau)h}; \quad (1)$$

$$r(\tau) \frac{d\varphi(\tau)}{d\tau} = \frac{\omega r(\tau)x}{h}, \quad (2)$$

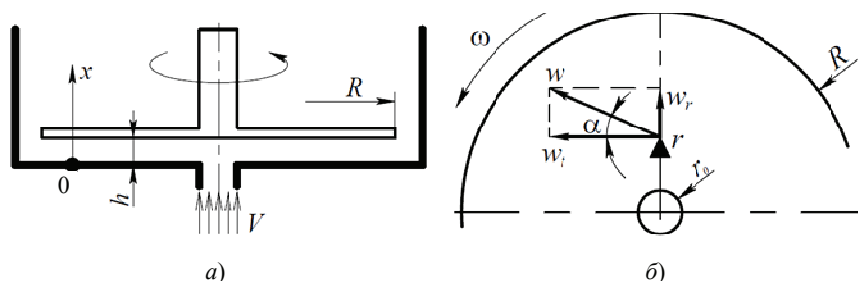


Рис. 2. Схема к определению параметров движения элементарного объема вязкой жидкости в зазоре между неподвижным и вращающимся плоскими дисками: а – поперечном сечении аппарата; б – плоскости зазора

где $r(\tau)$, $\varphi(\tau)$ – радиальная, м, и угловая, рад., текущие координаты соответственно; h – величина зазора, м; V – производительность, м³/с; ω – угловая скорость вращения ротора, с⁻¹.

При граничных условиях $r(0) = r_0$, $\varphi(0) = \varphi_0$, получены следующие решения:

$$r(\tau) = \frac{\sqrt{\pi h(V\tau + r_0^2 \pi h)}}{\pi h}; \quad (3)$$

$$\varphi(\tau) = \varphi_0 + \frac{\omega x \tau}{h}, \quad (4)$$

где x – координата элементарного объема, м (см. рис. 2, а).

Используя решения (3) и (4), легко получить траектории частиц и элементарных объемов жидкости в зазоре между неподвижным и вращающимся дисками с различными характеристиками потока и геометрией. Кроме того, можно рассчитать время пребывания частицы в зазоре и путь, пройденный ей между дисками. С помощью математического пакета Maple получены характерные траектории движения элементарных объемов жидкости в зазоре между неподвижным и вращающимся дисками с различными расходными характеристиками и геометрией, а также значения расчетной скорости, время пребывания и путь, пройденный элементарным объемом, в зависимости от начальной координаты и положения в зазоре. Экспериментальные исследования на лабораторной установке с диаметром диска 60 мм при скоростях вращения 300...1 500 об./мин показали удовлетворительную сходимость расчетных и экспериментальных значений.

На вертикальных участках движение вязкой жидкости в малом зазоре рассмотрим как движение между неподвижным и вращающимся цилиндром при следующих допущениях:

- жидкость несжимаемая;
- режим движения жидкости в радиальном зазоре ламинарный;
- влиянием силы тяжести пренебрегаем;
- поле скоростей в ламинарном зазоре осесимметрично;
- расход жидкости через аппарат постоянный во времени.

Используем уравнения движения вязкой несжимаемой жидкости в цилиндрических координатах [10]. С учетом сделанных допущений, уравнения принимают вид:

$$W_r(r) \frac{dW_r(r)}{dr} - \frac{W_\varphi^2(r)}{r} = \nu \left(\frac{d^2 W_r(r)}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dW_r(r)}{dr} - \frac{W_r(r)}{r^2} \right) - \frac{1}{\rho} \frac{dP(r)}{dr}; \quad (5)$$

$$R_0 \leq r \leq R_1;$$

$$W_r(r) \frac{dW_\varphi(r)}{dr} + \frac{W_\varphi(r)W_r(r)}{r} = \nu \left(\frac{d^2W_\varphi(r)}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dW_\varphi(r)}{dr} - \frac{W_\varphi(r)}{r^2} \right); \quad (6)$$

$$\frac{dW_r(r)}{dr} + \frac{W_r(r)}{r} = 0, \quad (7)$$

где W_r , W_φ – соответственно радиальная и окружная компоненты скорости, м/с; ρ , ν – соответственно плотность, кг/м³, и кинематическая вязкость, м²/с, жидкости; P – давление, Па; R_0 , R_1 – соответственно внутренний и внешний радиусы радиального зазора на рассматриваемом участке, м.

Граничные условия имеют вид:

$$W_\varphi(R_0) = W_0, \quad W_\varphi(R_1) = 0; \quad (8)$$

$$W_r(R_0) = W_1, \quad W_r(R_1) = \frac{R_0 W_1}{R_1}, \quad (9)$$

где $W_0 = \omega R_0$ – окружная скорость рабочей поверхности ротора, м/с; W_1 – радиальная скорость, определяемая расходом жидкости через роторно-импульсный аппарат, м/с.

В результате решения получаем:

$$W_\varphi(r) = \frac{R_0 W_0}{R_0^{2+k} - R_1^{2+k}} \left(r^{1+k} - \frac{R_1^{2+k}}{r} \right); \quad (10)$$

$$\frac{dW_\varphi(r)}{dr} = \frac{R_0 W_0}{R_0^{2+k} - R_1^{2+k}} \left((1+k)r^k + \frac{R_1^{2+k}}{r^2} \right). \quad (11)$$

Зависимости (10) и (11) описывают движение элементарного объема смеси на вертикальных участках дискового гомогенизатора. Таким образом, разделив путь элементарного объема на горизонтальные и вертикальные участки (рис. 1), по уравнениям (3), (4), (10) и (11) можно найти радиальные и окружные скорости элементарных объемов и их траектории, что необходимо для построения математической модели.

Математическая модель процесса смешивания

Процессы смешивания относятся к вероятностным или случайным процессам [11, 12]. Это в полной мере относится к процессу смешивания (гомогенизации) вязкой жидкости (пластичной смазки) и графеновых пластин. Действительно, графеновые пластины отличаются друг от друга числом графеновых слоев, латеральными размерами и формой, поэтому их перемещение в жидкости случайны. Доминирование случайности в свойствах и поведении частиц требует применения вероятностных моделей для описания проходящих в них процессов. Одним из замечательных математических аппаратов для описания эволюции систем со случайными свойствами является теория цепей Маркова.

Математическая модель никогда не претендует на полное исчерпывающее описание какого-либо процесса. Она строится для того, чтобы прогнозировать характер данного процесса при изменении большего или меньшего числа его параметров. Учитывая данные обстоятельства, воспользуемся самым простым видом цепей Маркова – однородных, одномерных, дискретных в пространстве

и времени. В соответствии со стратегией системного подхода рассмотрим качественную картину процесса на разработанной и изготовленной модельной установке, состоящей из двух прозрачных дисков (рис. 3).

Верхний диск неподвижен, а нижний соединен с приводом вращения. В центре верхнего диска установлен шприц для подачи пластичной смазки и графенового концентрата. Расстояние между дисками менее 1 мм. Сначала заполнили весь зазор графеновым концентратом, а затем начали подавать чистую смазку. В центре дисков образовался круг из чистой смазки. Когда продолжили подачу смазки, круг увеличился, и граница раздела графенового концентрата и смазки стала менее четкой. Это означает, что смешивание в радиальном направлении есть, но очень медленное. Для того чтобы исследовать качественный характер смешивания в окружном направлении, сначала заполнили весь зазор графеновым концентратом, а затем в круговом секторе (примерно 45°) убрали концентрат и заменили его чистой смазкой. После завершения данной процедуры включили привод вращения нижнего диска. При повороте диска примерно на 60° вся чистая смазка перемешалась с графеновым концентратом, что говорит об очень интенсивном смешивании в окружном направлении.

При создании математической модели, прежде всего, пространство моделирования (зазор между неподвижным и вращающимся дисками) надо разделить на ячейки с равными объемами (рис. 4, а).

По высоте каждой ячейки выделили три участка (рис. 4, б). На этих участках будут разные скорости и в радиальном направлении (рис. 4, в) и в окружном (рис. 4, з). Учитывая принцип суперпозиции сил, можно рассмотреть отдельно движение и смешивание (марковская цепь) в радиальном направлении (рис. 4, д) и окружном (рис. 4, е).

Состояние системы после перехода j представлено вектором состояния $S(j)$

$$S(j) = \{c(1, j), c(2, j), c(3, j), \dots, c(i, j), \dots, c(N, j)\}, \quad (12)$$

где $c(i, j)$ – концентрация графена в ячейке i после перехода j ; N – общее число ячеек.



Рис. 3. Модельная установка

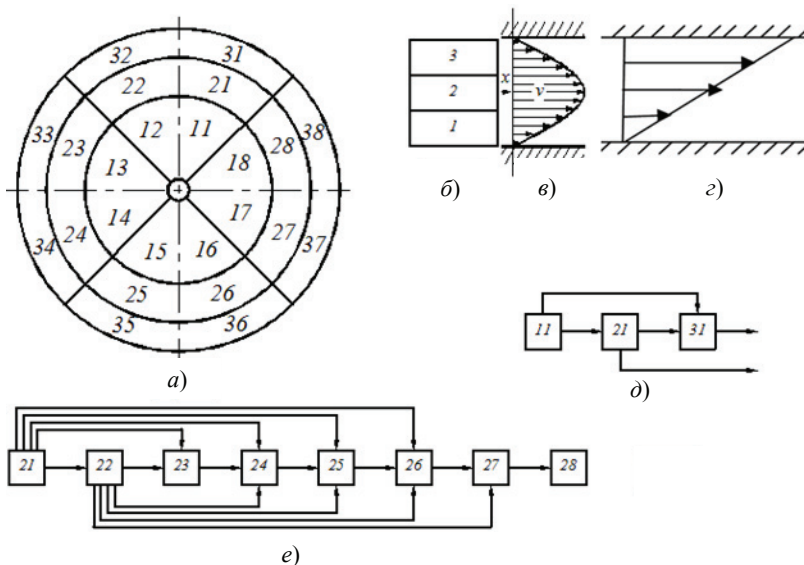


Рис. 4. Схемы к математической модели:

a – разделение пространства моделирования на ячейки с равными объемами; *б* – деление элементарного объема на участки; *в*, *г* – эпюры скоростей в радиальном и окружном направлениях соответственно; *д*, *е* – марковские цепи в радиальном и окружном направлениях соответственно

Изменения состояния системы отображено следующими соотношениями:

$$\begin{aligned}
 S(1) &= S(0) \times P; \\
 S(2) &= S(1) \times P; \\
 \dots\dots\dots \\
 S(j) &= S(j-1) \times P; \\
 \dots\dots\dots \\
 S(k) &= S(k-1) \times P,
 \end{aligned}
 \tag{13}$$

где $S(j)$ – вектор состояния системы после перехода j ; P – матрица переходных вероятностей; k – номер перехода, на котором заканчивается процесс.

Матрица переходных вероятностей имеет ту же размерность, что и вектор, а ее элементы равны вероятностям перехода графена из одних ячеек в другие. Элементы матрицы переходных вероятностей, то есть вероятности перехода графеновых пластин могут быть одинаковыми или разными на разных переходах. Учитывая, что концентрация графеновых пластин в смазке не превышает 1 масс.%, использовали более простой вариант с матрицей переходных вероятностей, постоянной на всех переходах.

Проведение модельных численных экспериментов

Для наглядности будем рассматривать отдельно смешивание в радиальном и окружном направлениях. Тогда на каждом переходе системы из одного состояния в другое будет сначала осуществляться процесс смешивания в радиальном направлении, а затем в окружном. Внесем изменения в схему на рис. 4, *a*, а именно, дополним ее еще одним кольцом с ячейками 41 – 48, которые характеризуют емкость для сбора модифицированной смазки, то есть в них накапливается готовый продукт и поэтому концентрация может быть больше 1. Когда перейдем к реальной концентрации, то есть учтем объем готового продукта, то концентра-

ция будет равна заданной концентрации графеновых пластин в смазке. Таким образом, в нашем случае, область моделирования состоит из четырех кольцевых зон и восьми секторов.

При рассмотрении смешивания в радиальном направлении будем использовать цепи Маркова, аналогичные показанной на рис. 4, *д*, но с добавлением ячейки 41, которая характеризует емкость, где собирается модифицированная смазка. За один переход принимаем время Δt , за которое смесь переместится в ячейки одной кольцевой зоны и в ячейки следующей. Зная объем каждой ячейки V_1 и производительность Q , численное значение Δt , в рассматриваемом варианте, можно определить по формуле

$$\Delta t = 8V_1 / Q. \quad (14)$$

Пусть начальное состояние системы имеет вид

$$S(0) = \{ 1; 0; 0; 0 \}. \quad (15)$$

Исходя из структуры марковской цепи (см. рис. 4, *д*), матрицу переходных вероятностей представим

$$P = \begin{bmatrix} P_{11,11} & P_{11,21} & P_{11,31} & P_{11,41} \\ P_{21,11} & P_{21,21} & P_{21,31} & P_{21,41} \\ P_{31,11} & P_{31,21} & P_{31,31} & P_{31,41} \\ P_{41,11} & P_{41,21} & P_{41,31} & P_{41,41} \end{bmatrix}. \quad (16)$$

Предположим, что элементы данной матрицы $p_{11,21} = p_{21,31} = 2/3$; $p_{11,31} = p_{21,41} = 1/3$; $p_{31,41} = p_{41,41} = 1$, а остальные элементы равны 0. Тогда, после завершения процесса смешивания в радиальном направлении, вектор состояния примет вид

$$S(1) = \{ 0; 0,67; 0,33; 0 \}. \quad (17)$$

Состояние системы существенно изменилось. В исходном состоянии ключевой компонент (графеновые пластины) находился только в ячейке 11, а после смешивания в радиальном направлении графеновые пластины присутствуют в ячейках 21 и 31, причем концентрация в ячейке 21 в два раза больше, чем в ячейке 31. Это объясняется тем, что в ячейку 21 перешли графеновые пластины с двух участков 1 и 3 (см. рис. 4, *б*), а в ячейку 31 – только с участка 2. В реальном процессе численные значения элементов матрицы могут быть совершенно другими, но в данном случае исследуется только качественная сторона процесса смешивания.

Следующий этап процесса – смешивание в окружном направлении. В этом случае цепь Маркова будет аналогична схеме (см. рис. 4, *е*). Следует отметить, что векторами исходных состояний являются вектора, составленные из элементов конечных состояний системы после реализации процесса смешивания в радиальном направлении для всех секторов, то есть на первом этапе необходимо реализовать процесс смешивания в радиальном направлении для восьми секторов, а на втором – для трех кольцевых зон. Отметим, что в наружной кольцевой зоне процесса смешивания не происходит.

Для второй кольцевой зоны вектор исходного состояния имеет вид

$$S(0) = \{ 0; 0,67; 0; 0; 0; 0; 0; 0 \}. \quad (18)$$

При окружном смешивании матрица переходных вероятностей имеет следующий вид:

Во второй серии имитировали неравномерность распределения графеновых пластин в исходной смеси во времени. Смазку, содержащую графеновые пластины, на каждом переходе загружали во все ячейки первой кольцевой зоны, но с разными концентрациями графеновых пластин.

Процессы смешивания в каждой серии продолжали до тех пор, пока переставал изменяться коэффициент неоднородности в ячейках девятой кольцевой зоны.

Анализ результатов численных экспериментов показал, что коэффициенты неоднородности в первой серии, при прочих равных условиях, меньше тех, которые получали во второй. Учитывая данный результат, целесообразно исследовать вариант одновременной подачи пластической смазки и графенового концентрата в гомогенизатор-диспергатор двумя насосами с соответствующими производительностями.

Выводы

Исследовано движение вязкой жидкости в малом зазоре между неподвижным и вращающимся дисками. Получены математические зависимости для определения основных параметров движения вязкой жидкости в зазорах между плоскими и ступенчатыми дисками. На основе математического аппарата случайных марковских процессов, дискретных в пространстве и времени, разработана модель процесса смешивания пластичной смазки с графеновыми пластинами. Декомпозиция процесса смешивания на радиальную и окружную составляющие позволила оценить интенсивность каждой из указанных составляющих. Используя результаты численных экспериментов, намечены пути совершенствования организации загрузки смазки и модификатора в гомогенизатор в целях повышения равномерности распределения графеновых пластин по всему объему смазки и стабилизации трибологических характеристик.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-38-90159.

Список литературы

1. Extraordinary Macroscale Wear Resistance of One Atom Thick Graphene Layer / D. Berman, S. A. Deshmukh, S. K. R. S. Sankaranarayanan [et al.] // *Advanced Functional Materials*. – 2014. – Vol. 24, No. 42 (2014). – P. 6640 – 6646. doi: 10.1002/adfm.201401755
2. Experimental Research on Tribological Properties of Liquid Phase Exfoliated Graphene as an Additive in 30 SAE 10W Lubricating Oil / Xinbo Wang, Yafei Zhang, Zhongwei Yin [et al.] // *Tribology International*. – 2019. – Vol. 135. – P. 29 – 37.
3. Phosphonium-Organophosphate Modified Graphene Gel Towards Lubrication Applications / Chaoliang Gan, Ting Liang, Duoli Chen [et al.] // *Tribology International*. – 2020. – Vol. 145. – P. 106180. doi: 10.1016/j.triboint.2020.106180
4. Berman, D. Reduced Wear and Friction Enabled by Graphene Layers on Sliding Steel Surfaces in Dry Nitrogen / D. Berman, A. Erdemir, A. V. Sumant // *Carbon*. – 2013. – Vol. 59. – P. 167 – 175. doi: 10.1016/j.carbon.2013.03.006
5. Advances in Carbon Nanomaterials as Lubricants Modifiers / I. Ali, Al Arsh Basheer, A. Kucherova [et al.] // *Journal of Molecular Liquids*. – 2019. – Vol. 279. – P. 251 – 266. doi: 10.1016/j.molliq.2019.01.113
6. Development of Environmentally Safe Lubricants Modified by Graphene / V. F. Pershin, K. A. Ovchinnikov, Z. A. Alhilo [et al.] // *Nanotechnologies in Russia*. – 2018. – Vol. 13, No. 5-6. – P. 344 – 348. doi: 10.1134/S1995078018030138

7. Modification of Frost-Resistant Plastic Lubricants Using Few- and Multi-Layered Graphene / A. Tkachev, G. Zhumagalieva, Z. Al-Hilo [et al.] // Proceedings of the 4th World Congress on Recent Advances in Nanotechnology (RAN'19). – Rome, 2019. – P. ICNNFC 105-1–105-2. doi: 10.11159/icnnfc19.105

8. Alhilo, Z. A. A. Environmentally Friendly Technology for the Modification of Lubricants with Graphene Nanostructures / Z. A. A. Alhilo, G. Zhumagalieva, T. Pasko // MATEC Web of Conferences. – 2020. – Vol. 315. – P. 06005. doi: 10.1051/mateconf/202031506005

9. Simulation of Graphene-Containing Viscous Fluid Motion in the Gap Between Static and Rotating Discs / V Pershin, A Baranov, N. Memetov [et al.] // Proceedings of the 5th International Scientific and Practical Conference on Virtual Simulation, Prototyping and Industrial Design 2018, 14 – 16 ноября 2018 г., Тамбов. – Тамбов, 2019. – Vol. 1278. – P. 012025. doi: 10.1088/1742-6596/1278/1/012025

10. Ландау, Л. Д. Теоретическая физика : учеб. пособие. В 10 томах. Т. VI Гидродинамика / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. – 3-е изд. – М. : Наука, 1986. – 736 с.

11. Баранцева, Е. А. Процессы смешивания сыпучих материалов: моделирование, оптимизация, расчет / Е. А. Баранцева, В. Е. Мизонов, Ю. В. Хохлова. – Иваново : Ивановский гос. энергетический ун-т им. В. И. Ленина, 2008. – 116 с.

12. An Investigation of the Process of Mixing of Bulk Materials in a Drum-Blade Mixer / S. N. Cherpitskii, M. Y. Tarshis, L. V. Korolev, A. B. Kapranova // Chemical and Petroleum Engineering. – 2020. – Vol. 56, No. 1-2. – P. 3 – 10. doi: 10.1007/s10556-020-00731-w

Simulation of the Mixing Process in a Disc Homogenizer Disperser

Z. A. Alkhilo, A. A. Baranov, V. Mansur,
E. N. Tugolukov, A. A. Pasko, V. F. Pershin

*Department of Equipment and Technology for the Development of Nanoproducts,
pershin.home@mail.ru; TSTU, Tambov, Russia*

Keywords: graphite; few-layer graphene; multilayer graphene; grease; mixing; Markov chains.

Abstract: The movement of viscous fluid in a small gap between stationary and rotating disks is investigated and a mathematical description is given for flat and stepped disks. Using the mathematical apparatus of random Markov processes discrete in space and time, a model of the process of mixing grease with graphene plates in a rotary homogenizer disperser has been created. Decomposition of the process and consideration of separate mixing processes in the radial and circumferential directions made it possible to assess the intensity of these processes and develop recommendations for the transition from laboratory installations to industrial devices.

References

1. Berman D., Deshmukh S.A., Sankaranarayanan S.K.R.S., Erdemir A., Sumant A.V. Extraordinary Macroscale Wear Resistance of One Atom Thick Graphene Layer, *Advanced Functional Materials*, 2014, vol. 24, no. 42 (2014), pp. 6640-6646, doi: 10.1002/adfm.201401755

2. Wang Xinbo, Zhang Yafei, Yin Zhongwei, Su Yanjie, Zhang Yanping, Cao Jun 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.

3. Gan Chaoliang, Liang Ting, Chen Duoli, Li Wen, Fan Xiaoqiang, Tang Guanxiong, Lin Bo, Zhu Minhao Phosphonium-Organophosphate Modified Graphene Gel Towards Lubrication Applications, *Tribology International*, 2020, vol. 145, p. 106180, doi: 10.1016/j.triboint.2020.106180

4. Berman D., Erdemir A., Sumant A.V. Reduced Wear and Friction Enabled by Graphene Layers on Sliding Steel Surfaces in Dry Nitrogen, *Carbon*, 2013, vol. 59, pp. 167-175, doi: 10.1016/j.carbon.2013.03.006

5. Ali I., Basheer Al Arsh, Kucherova A., Memetov N., Pasko T., Ovchinnikov K., Pershin V., Kuznetsov D., Galunin E., Grachev V., Tkachev A. Advances in Carbon Nanomaterials as Lubricants Modifiers, *Journal of Molecular Liquids*, 2019, vol. 279, pp. 251-266, doi: 10.1016/j.molliq.2019.01.113

6. Pershin V.F., Ovchinnikov K.A., Alhilo Z.A.A., Stolyarov R.A., Memetov N.R. Development of Environmentally Safe Lubricants Modified by Graphene, *Nanotechnologies in Russia*, 2018, vol. 13, no. 5-6, pp. 344-348, doi: 10.1134/S1995078018030138

7. Tkachev A., Zhmagaliev G., Al-Hilo Z., Memetov N., Galunin E., Pershin V. 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), Rome, 2019, pp. ICNNFC 105-1–105-2, doi: 10.11159/icnnfc19.105

8. Alhilo Z.A.A., Zhmagaliev G., Pasko T. Environmentally Friendly Technology for the Modification of Lubricants with Graphene Nanostructures, *MATEC Web of Conferences*, 2020, vol. 315, p. 06005, doi: 10.1051/mateconf/202031506005

9. Pershin V., Baranov A., Memetov N., Tugolukov E., Alhilo Z. Simulation of Graphene-Containing Viscous Fluid Motion in the Gap Between Static and Rotating Discs, Proceedings of the 5th International Scientific and Practical Conference on Virtual Simulation, Prototyping and Industrial Design 2018, 14 - 16 November, 2018, Tambov, 2019, vol. 1278, p. 012025, doi: 10.1088/1742-6596/1278/1/012025

10. Landau L.D., Lifshits Ye.M. *Teoreticheskaya fizika: uchebnoye posobiye. V 10 tomakh. T. VI Gidrodinamika* [Theoretical physics: textbook. In 10 volumes. Vol. VI Hydrodynamics], Moscow: Nauka, 1986, 736 p. (In Russ.)

11. Barantseva Ye.A., Mizonov V.Ye., Khokhlova Yu.V. *Protsessy smeshivaniya sypuchikh materialov: modelirovaniye, optimizatsiya, raschet* [Processes of mixing loose materials: modeling, optimization, calculation], Ivanovo: Ivanovskiy gos. energeticheskiy un-t im. V. I. Lenina, 2008, 116 p. (In Russ.)

12. Cherpitskii S.N., Tarshis M.Y., Korolev L.V., Kapranova A.B. An Investigation of the Process of Mixing of Bulk Materials in a Drum-Blade Mixer, *Chemical and Petroleum Engineering*, 2020, vol. 56, no. 1-2, pp. 3-10, doi: 10.1007/s10556-020-00731-w

Mischprozesssimulation in einem Scheibenhomogenisierungsapparat-Dispergierer

Zusammenfassung: Es ist die Bewegung einer viskosen Flüssigkeit in einem kleinen Spalt zwischen einer stationären und einer rotierenden Scheibe untersucht und die mathematische Beschreibung für flache und gestufte Scheiben ist gegeben. Auf der Grundlage der mathematischen Apparatur zufälliger Markov-Prozesse, die räumlich und zeitlich diskret sind, ist ein Modell des Prozesses zum Mischen eines Fettes mit Graphenplatten in einem rotierenden Homogenisator-Dispergierer erstellt. Die Zerlegung des Prozesses und die Berücksichtigung getrennter Mischprozesse in radialer und Umfangsrichtung ermöglichten es, die Intensität dieser Prozesse zu bewerten und Empfehlungen für den Übergang von Laborinstallationen bis zu industriellen Geräten zu entwickeln.

Modélisation du processus du mélange dans l'homogénéisateur-disperseur à disque

Résumé: Est étudié le mouvement du fluide visqueux dans le petit espace entre les disques fixes et rotatifs; est donnée une description mathématique pour les disques plats et étagés. A la base d'un appareil mathématique des processus aléatoires discrets dans l'espace et le temps de Markov, est établi un modèle du mélange de la graisse avec des plastiques de graphène dans un homogénéisateur-disperseur rotatif. La décomposition du procédé et l'examen séparé des processus de mélange dans les directions radiale et circonférentielle ont permis d'évaluer l'intensité de ces processus et d'élaborer des recommandations pour la transition des installations de laboratoire aux appareils industriels.

Авторы: *Алхило Заман Абуд* – аспирант кафедры «Техника и технологии производства нанопроductов»; *Баранов Андрей Алексеевич* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Техника и технологии производства нанопроductов»; *Мансур Васем* – аспирант кафедры «Техника и технологии производства нанопроductов»; *Туголуков Евгений Николаевич* – доктор технических наук, профессор кафедры «Техника и технологии производства нанопроductов»; *Пасько Александр Анатольевич* – кандидат технических наук, доцент 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 «Механика и инженерная графика», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.