

Биомиметический подход к созданию полимерных материалов с улучшенными трибологическими свойствами

**Григорьев А.А.^{1,2}, Исаев Е.А.³, Первухин Д.В.⁴, Петрушин В.Н.⁵,
Доронин Ф.А.⁴, Рудяк Ю.В.⁴, Рытиков Г.О.^{4,5}, Назаров В.Г.⁴**

¹*Финансовый университет при правительстве РФ, г. Москва, Россия*

²*Московский государственный университет технологий и управления
имени К.Г. Разумовского, г. Москва, Россия*

³*Институт математических проблем биологии РАН –
филиал ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, г. Пущино, Россия*

⁴*Московский политехнический университет, г. Москва, Россия*

⁵*Институт современного искусства, г. Москва, Россия*

Аннотация. Работа посвящена применению методов прикладной математики и статистики для формализации и математического моделирования структуры акульей кожи. Описана техника математического моделирования биологических объектов (на примере кожи акулы) и предложен способ применения биомиметического подхода для проектирования планарно-композиционных полимерных материалов судостроительного назначения с улучшенными лиофильно-адгезионными свойствами. В результате изучения полученных средствами высокоразрешающей оптической (ВОМ) и сканирующей электронной (СЭМ) микроскопии изображений акульей кожи установлено, что её текстура анизотропна. Количественный анализ ВОМ- и СЭМ-изображений позволил осуществить рационализацию выбора синтетических цифровых моделей, предназначенных для имитационного прототипирования максимально и минимально текстурно-изотропных полимерных образцов средствами 3D-печати и газофазной поверхностной модификации.

Ключевые слова: *цифровые модели, создание материалов, сканирующая электронная микроскопия, природоподобие, биомиметика, анализ изображений, двумерный ряд Фурье, трибологические свойства.*

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время полимеры являются одним из наиболее значимых и востребованных классов материалов, обеспечивающих возможность создания и развития целого ряда инновационных инженерных решений и технологий [1–4]. Широкий диапазон применимости в различных отраслях экономики указывает на необходимость и приоритетность исследований в области направленного регулирования свойств полимерных материалов с помощью рационального выбора их структуры (элементного состава, химического строения, пространственного распределения плотности и др.) и технологических режимов её изменения [5–9].

Методы проектирования полимерных материалов можно условно классифицировать на: функционально- [10], технологически- [11] и структурно- [12] ориентированные. В отечественной литературе (например, [13–24]) особенности разработки составов многокомпонентных композитов были описаны в [21], использование родства структур

в качестве эффективного инструмента проектирования композиционных материалов нового поколения предложено в [22], проектирование кристаллографической структуры конструкционных материалов отражено в работе [23]. Обобщённая методология проектирования структурно-неоднородных полимерных материалов представлена в [24].

Возможности применения информационных технологий и систем для проектирования материалов (в том числе полимерных) продемонстрированы в серии работ [22, 25–30], в частности, методология решения задачи многокритериального выбора при проектировании нового материала сформулирована в [25]. Техника применения цифрового инструмента компьютерной поддержки проектирования наноструктурированных полупроводников представлена в [26]; описание системы автоматизированного проектирования полимерных наполненных композиционных материалов приведено в [27]. Использование систем виртуального моделирования для рационализации процедур выбора и совершенствование полимерных композитов описано в [28, 29]. В работе [30] дана методика информационно-логического проектирования структуры и состава полимерных композитов с заданным набором функционально-эксплуатационных свойств.

В различной степени удачные попытки направленного регулирования поверхностных свойств полимерных материалов даны в литературе [20–24]: о возможности применения имитаций биологических поверхностей, обладающих специфическими гидромеханическими свойствами, для решения ряда технологических задач сообщалось в [21], при этом, соответствующие эксперименты, были проведены на трёхмерных структурах («рёбрышках»), реализующих «модель акульей кожи» [22]. Наблюдавшиеся эффекты снижения сопротивления потока жидкости, изменения лиофильности и самоочистения нано-текстурированных поверхностей продемонстрированы в [23–25].

О целенаправленном формировании биомиметических структур, предназначенных для снижения сопротивления потоку жидкости и имитирующих акулюю кожу сообщено в [26], где обсуждались взаимосвязи между эффектами «акульей кожи», «лепестков лотоса», «крыльев бабочки», «рисовых листьев». В [27] был предложен биоинспирированный подход к разработке противообрастающих биоматериалов. Изготовлению биоимитирующих нано- и микроструктурных поверхностей для придания антибактериальных свойств медицинским имплантам посвящена работа [28].

Нами разработана новая реализация биомиметического подхода к проектированию полимерных материалов с улучшенными гидротрибологическими свойствами (пониженным сопротивлением потоку жидкости), основанная на количественном анализе оптических и сформированных средствами сканирующей электронной микроскопии разномасштабных изображений акульей кожи, позволяющей прототипировать соответствующие текстуры с помощью методов 3D-печати.

Придание поверхностным слоям используемых для решения судостроительных задач конструкционных полимерных материалов трибологических свойств акульей кожи представляется значимой задачей современного материаловедения. Известно, что интегральные прочностные характеристики материалов, из которых изготавливаются корпуса морских судов, выше, чем соответствующие параметры любого из существующих биологических объектов [29]; однако, искусственные материалы уступают покровным тканям обитающих в воде животных по трибологическим и адгезионным свойствам [30]; для изменения лиофильно-адгезионных свойств, используемых в судостроении конструкционных полимеров (с учётом необходимости сохранения их высоких механических характеристик) [31], необходимо осуществлять направленную структурную трансформацию поверхностных слоёв соответствующих изделий, не затрагивающую морфологических характеристик объёма полимерных матриц [32].

Известно, что основными концептуальными подходами к созданию новых полимерных материалов являются синтез [33] и модификация [34], последняя предоставляет широкий спектр возможностей по комбинированию сочетаний, характерных для различных полимеров при формировании полимерных композитов [35].

Одним из наиболее перспективных способов модификации является обработка поверхности с помощью тех или иных физических и/или химических воздействий [36].

К основным методам модификации полимеров, способствующим изменению морфологии поверхности, относятся: облучение, деформация, воздействие электромагнитными полями, обработка химическими реагентами и т.д. [37–39].

Известно, что функциональные (трибологические [40], лиофильные [41], адгезионные [42]) и эксплуатационные свойства (устойчивость к внешним атмосферным [43], химическим [44] и другим воздействиям [45]) зависят от химического состава и структуры полимера [46].

Обеспечивающая хемо- и текстурно-морфологические трансформации обработка поверхностей позволяет улучшать некоторые свойства полимерных материалов [47–52]: газофазное фторирование [48] позволяет достигать максимальной гидрофобности поверхности [49]; сульфирование [50, 51] – гидрофилизировать поверхность, минимизируя количество активного реагента; плазмохимическая обработка [52] улучшает антифрикционные свойства и т.д.

Как правило, в результате модификации поверхности, химическая структура и микрорельеф полимера претерпевают существенные изменения [53]. В отличие от физико-химического воздействия (окисление [54]), при физическом воздействии (напылении металлического покрытия [55]), структура макромолекул самого полимера остается неизменной. Таким образом, выбирая способ и режим модификации поверхности, адгезионными, лиофильными, трибологическими и многими другими свойствами полимерных материалов можно управлять эффективно [56–58]. В частности, микротекстурирование изготовленных методом аддитивного прототипирования макроскопических экспериментальных образцов может осуществляться за счёт сочетания механических напряжений (при деформации гибкой полимерной подложки в различных направлениях с разными удельными механическими усилиями [59]) с последующей поверхностной модификацией [60] полимерного материала фтор- и кислородсодержащими газовыми смесями [61–63].

Для визуального анализа морфологической структуры полимерных материалов в настоящее время применяется высокотехнологичное оборудование, характеризующееся высоким пространственным разрешением [64]. Мощным инструментом визуализации химической структуры и микротекстуры поверхности являются методы поляризационно-оптической (ПОМ) [65] и сканирующей электронной (СЭМ) [66] микроскопии. Возможность прогнозирования физико-химических свойств поверхностно модифицированных полимерных материалов в значительной степени зависит от способа и точности количественного анализа соответствующих изображений [67–69]. Разработанные ранее оригинальные методы количественного анализа СЭМ-изображений представлены в [70–74].

Количественный анализ разномасштабных изображений кожи обитающих в водной среде животных позволяет создавать цифровые модели соответствующих текстур и, как следствие, осуществлять прототипирование [75] функциональных покрытий, характеризующихся повышенным и/или пониженным вязким трением [76, 77] на полимерных плёнках и/или профилях классическими методами 3D-печати [78] по FFF-технологии [79]. Таким образом, предложенный подход может быть отнесён к элементам структурной биологии в контексте моделирования и предсказания (по экспериментальным данным) структуры формирующих покровные ткани рыб комплексов биомолекул.

МЕТОДОЛОГИЯ

Цифровой образ, определяющий характер распределения вещества в поверхностных слоях экспериментальных образцов, задаётся табличной функцией $B(x,y)$ зависимости значений яркости B пикселей от их координат (x, y) :

$$B(x, y) = \sum_{k=0}^K \sum_{l=0}^L H_{kl}(x, y), \quad (1)$$

и может быть представлен в форме суперпозиции бигармоник (периодических пространственных решёток кратных частот λ^{-1}) разложения в двумерный ряд Фурье $H_{kl}(x,y)$

$$H_{kl} = (\overline{a_{kl}}; \overline{f_{kl}}(x, y) \sum_{m=1}^4 a_{kl,m} \cdot f_{kl,m}(x, y)), \quad (2)$$

$$\overline{a_{kl}} = \begin{pmatrix} a_{kl,1} \\ a_{kl,2} \\ a_{kl,3} \\ a_{kl,4} \end{pmatrix} = \frac{1}{N_{kl}} \cdot \int \int_{-\infty}^{+\infty} \left\{ B(x, y) \cdot \begin{pmatrix} f_{kl,1} \\ f_{kl,2} \\ f_{kl,3} \\ f_{kl,4} \end{pmatrix} \right\} dx dy, \quad (2a)$$

$$\overline{f_{kl}}(x, y) = \begin{pmatrix} f_{kl,1}(x, y) \\ f_{kl,2}(x, y) \\ f_{kl,3}(x, y) \\ f_{kl,4}(x, y) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(2\pi \cdot k \cdot x / \lambda) \cos(2\pi \cdot l \cdot y / \lambda) \\ \cos(2\pi \cdot k \cdot x / \lambda) \sin(2\pi \cdot l \cdot y / \lambda) \\ \sin(2\pi \cdot k \cdot x / \lambda) \cos(2\pi \cdot l \cdot y / \lambda) \\ \sin(2\pi \cdot k \cdot x / \lambda) \sin(2\pi \cdot l \cdot y / \lambda) \end{pmatrix}, \quad (2b)$$

координаты $\{a_{kl}\}_m$ вектора амплитуд $\overline{a_{kl}}$ которых формируют морфологический спектр $\{A_{kl}\}_{K \times L}$, где A_{kl} определяется как декартово расстояние:

$$A_{kl} = \sum_{m=1}^4 a_{kl,m}^2, \quad (3)$$

в пространстве векторов решётки с максимальными значениями k и l -индексов бигармоник. Характерные масштабы областей текстурной однородности поверхности λ могут быть оценены с помощью разработанной ранее оригинальной техники вариационно-ротационных картин.

Вариационно-ротационная картина формируется в результате попиксельного усреднения M цифровых образов изображений поверхности:

$$B_M(x, y) = B_0(x_M, y_M) \quad (4)$$

описывающих характеризуемое изображение в системах координат, повернутых относительно исходной на некоторые углы φ_M . Координаты пикселей в повернутой и исходной системах координат связаны известными соотношениями:

$$\begin{cases} x_M = x \cdot \cos \varphi_M + y \cdot \sin \varphi_M \\ y_M = -x \cdot \sin \varphi_M + y \cdot \cos \varphi_M \end{cases} \quad (5)$$

В результате нормирования стандартных отклонений на средние значения яркостей пикселей $B(x,y)$ (усреднение осуществлялось по ансамблю цифровых образов $\{\tilde{B}_M(x, y)\}_M$ формируется вариационно-ротационная картина (ВРК):

$$V(x, y) = \left(\sqrt{\frac{1}{M-1} \sum_{m=1}^M (B_m(x, y) - \bar{B}(x, y))^2} \right) / \left(\frac{1}{M} \sum_{m=1}^M B_m(x, y) \right) \quad (6)$$

позволяющая визуализировать степень морфологической гетерогенности анализируемой поверхности, обеспечивающей возможность измерения характерных размеров λ соответствующих текстурных доменов, необходимых для рационального выбора масштаба и техники получения изображения микротекстуры поверхности.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рисунке 1 представлены ВОМ- и СЭМ-изображения акульей кожи, а также соответствующие цифровые образы при четырёх-битовом кодировании яркостей пикселей.

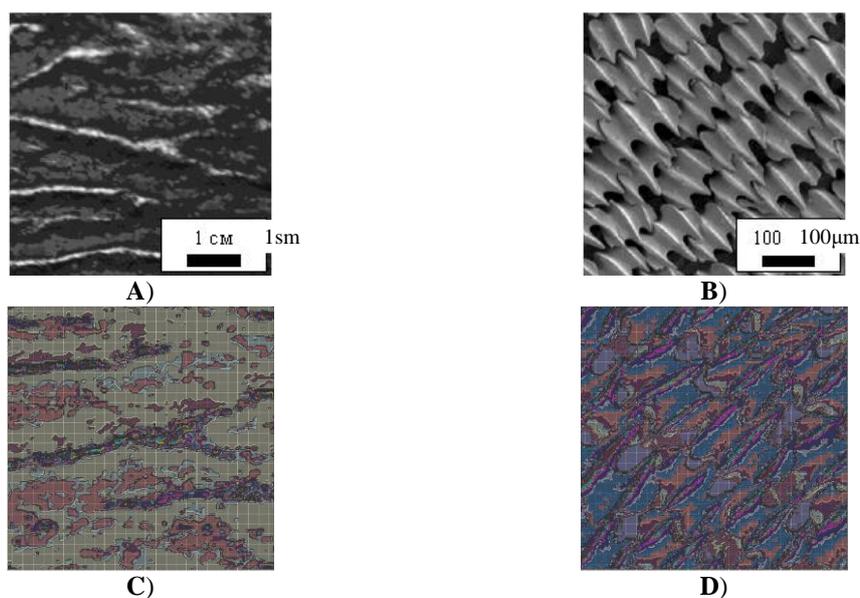


Рис. 1. Типичные ВОМ- (А) и СЭМ- (В) изображения акульей кожи, а также результат четырёх-битной визуализации соответствующих цифровых образов (С, D).

Определяющая целевые свойства текстура поверхности кожи акулы характеризуется существенной анизотропией, определяющей вариативность поверхностных свойств кожи, проявляемую при движении животного в различных направлениях.

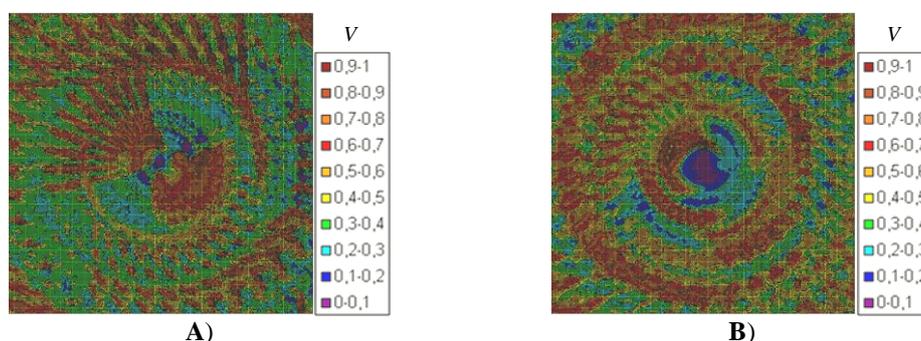


Рис. 2. Вариационно-ротационные картины, количественно характеризующие цифровые образы, полученные для: оптического изображения кожи акулы с масштабом 1 см (А) и СЭМ-изображения кожи акулы с масштабом 100 мкм (В) (V – коэффициент вариации яркостей пикселей изображений).

В соответствии с вышеописанной оригинальной методикой на основе представленных изображений были сформированы вариационно-ротационные картины

(рис. 2), позволившие оценить характерные размеры морфологической гомогенности анализируемой поверхности на макро- и микро масштабах.

Видно, что характерные размеры областей макро- и микроскопической морфологической гомогенности акульей кожи составляют ~ 1 мм и ~ 20 мкм соответственно. При этом, формы границ областей морфологической гомогенности, в значительной степени, отличаются от окружностей.

Исследование текстур экспериментальных образцов с помощью оригинального метода количественного анализа соответствующих изображений показал, что морфологические спектры цифровых образов ВОМ- и СЭМ-изображений акульей кожи ожидаемо демонстрируют существенную зависимость от выбора системы координат (табл. 1 (ВОМ), табл. 2 (СЭМ)).

Таблица 1. Ротационная анизотропия морфологического спектра цифрового образа ВОМ-изображения акульей кожи

| $\varphi_M,$ | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 |
|---------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| I | | | | | | | | | | |
| S | | | | | | | | | | |
| G | | | | | | | | | | |
| ε | 0.91 | 0.92 | 0.86 | 0.77 | 0.66 | 0.32 | 0.55 | 0.75 | 0.86 | 0.91 |
| R | | | | | | | | | | |

Таблица 2. Ротационная анизотропия морфологического спектра цифрового образа СЭМ-изображения акульей кожи

| $\varphi_M,$ | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 |
|---------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| I | | | | | | | | | | |
| S | | | | | | | | | | |
| G | | | | | | | | | | |
| ε | 0.26 | 0.61 | 0.76 | 0.86 | 0.91 | 0.91 | 0.86 | 0.76 | 0.58 | 0.26 |
| R | | | | | | | | | | |
| r | 0.19 | 0.07 | 0.08 | 0.20 | 0.17 | 0.15 | 0.22 | 0.17 | 0.06 | 0.15 |

В обеих таблицах использованы следующие обозначения: I – цифровые образы, сформированные при поворотах исходного изображения по часовой стрелке с шагом в 10 градусов; S – морфологические спектры, характеризующие количественно вышеуказанные цифровые образы; G – результаты аппроксимации морфологических спектров функцией Гаусса двух переменных; ε – эксцентриситет эллиптического сечения функции Гаусса по уровню $1/e^2$; R – синтезированные варианты реализации иррегулярных текстур, обладающих морфологическими спектрами, идентичными рассмотренным.

Таким образом, показано, что для рассмотренного объекта существуют системы координат, обеспечивающие минимальные (0.32 и 0.26) значения эксцентриситетов эллипсов, сформированных как плоские сечения по уровню $1/e^2$ поверхностей, визуализирующих двумерные функции Гаусса, аппроксимирующие морфологические спектры макроскопического и микроскопического изображений соответственно.

ВЫВОДЫ

Определяющая трибологические свойства текстура акульей кожи характеризуется существенной анизотропией, которая была исследована и параметризована в результате количественного анализа соответствующих ВОМ- и СЭМ- изображений.

При аддитивном прототипировании имитационных физических моделей акульей кожи с предельно изотропной и предельно анизотропной макроскопической текстурами необходимо выбирать те цифровые образы, которые были сформированы на основе изображений морфологических спектров, соответствующих повороту исходного на 50 и на 10 градусов соответственно, при этом, максимальная ротационная анизотропия на микроуровне будет достигаться при растяжении вдоль любой из осей макроскопической декартовой системы координат, а минимальная – при растяжении вдоль любой из прямых, образующих с осями макроскопической системы координат угол в 45 градусов.

Макроразмерные неоднородности акульей кожи (крупные складки) ориентированы, преимущественно, вдоль «оси симметрии» акулы. При растяжении имитационной модели (образца) вдоль соответствующего направления складки будут удлиняться, что приводит к увеличению макроскопической ротационной анизотропии: если растягивать образцы вдоль поперечного направления- складки будут утолщаться и укорачиваться, что приведёт к уменьшению макроскопической ротационной анизотропии.

Микроразмерные неоднородности акульей кожи (чешуйки) при растяжении «вдоль» или «поперёк» будут отстоять друг от друга на большие расстояния, чем в нерастянтом состоянии, что приведёт к увеличению ротационной анизотропии на микроуровне. Если же растягивать шкуру акулы вдоль направления, образующего 45 градусов с её осью симметрии- смещение чешуек друг относительно друга будет происходить вдоль обоих направлений одновременно. И, хотя расстояние между чешуйками и будет увеличиваться, но: 1) в квадратный корень из двух меньше по величине, чем в случае растяжения «вдоль» или «поперек» (при одном и том же растягивающем усилии); 2) при таком «напряжённом» состоянии поверхности ротационная изотропия будет максимальной из возможных (ротационная анизотропия соответственно будет минимальной).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной статье описана техника применения биомиметического подхода для создания полимерных покрытий, способных обеспечить улучшение эксплуатационных характеристик водных судов. Такие покрытия должны обладать пониженным сопротивлением потоку воды и меньше обрастать. Натурные испытания в предметной области являются чрезвычайно ресурсоёмкими и продолжительными: целесообразным является создание имитационных моделей соответствующих покрытий средствами 3D-

печати и определение их свойств в лабораторных условиях. Принимая во внимания высокую эффективность эволюционных механизмов совершенствования органов живых существ, для имитации структуры разрабатываемых покрытий была выбрана типичная текстура акульей кожи, обладающая необходимым набором трибологических и антисорбционных свойств.

Изображения акульей кожи могут быть получены, скопированы и имитированы средствами 3D-печати различными способами. На основании компьютерного анализа небольшого количества таких изображений осуществлён рациональный выбор ракурса и направлений деформаций соответствующих образцов, что обеспечивает возможность представления улучшенных трибологических характеристик исходных полимерных материалов на основании их направленного текстурирования.

В дальнейшем будет реализовано комплексное эмпирическое изучение свойств имитационных моделей, изготовление которых средствами аддитивного прототипирования проводится по следующему алгоритму:

а) выбираются макро- и микромасштабные изображения кожи акулы, обитающей в регионе, в котором планируется длительная эксплуатация морского судна;

б) в соответствии с оригинальной методикой осуществляется количественная характеристика этих изображений;

в) синтезируется цифровой образ, заведомо обладающий амплитудами морфологического спектра, аналогичными характеристикам исходного изображения, но при стохастической фазовой реализации бигармоник;

г) цифровой образ передаётся в память устройства 3D-печати и осуществляется непосредственное изготовление имитационной модели.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (государственное задание FZRR-2023-0003).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kazemi M., Fini E.H. State of the art in the application of functionalized waste polymers in the built environment. *Resources, Conservation and Recycling*. 2022. V. 177. P. 105967.
2. Hasseb A.A., Abdel Ghani N.D.T., Shehab O.R., El Nashar R.M. Application of molecularly imprinted polymers for electrochemical detection of some important biomedical markers and pathogens. *Current Opinion in Electrochemistry*. 2022. V. 31. P. 100848.
3. Gbadamosi A., Patil S., Kamal M.S., Adewunmi A.A., Yusuff A.S., Agi A., Oseh J. Application of polymers for chemical enhanced oil recovery: a review. *Polymers*. 2022. V. 14. № 7.
4. Cao X., Ye Z., Li X., Xu Y.-J., Liu Y. Synthesis and application of magnetic surface molecularly imprinted polymers in selective solid-phase extraction of epoxy triglyceride from deep frying oil. *Food Control*. 2022. V. 137. P. 108896.
5. Исаев Е.А., Доронин Ф.А., Евдокимов А.Г., Первухин Д.В., Рудяк Ю.В., Рытиков Г.О., Корнилов В.В., Назаров В.Г. Количественная оценка развития колонии микромицетов на поверхностях полимеров и композитов на их основе. *Математическая биология и биоинформатика*. 2021. Т. 16. № 2. С. 367–379. doi: [10.17537/2021.16.367](https://doi.org/10.17537/2021.16.367)
6. Po R., Bernardi A., Calabrese A., Carbonera C., Corso G., Pellegrino A. From Lab to Fab: how must the polymer solar cell materials design change? – An industrial perspective. *Energy & Environmental Science*. 2014. V. 7. № 3. P. 925–943.
7. Правада Е.С., Люсова Л.Р., Карпова С.Г., Антман Е.И., Котова С.В. Влияние структурно-динамических параметров на адгезионные свойства 3,4-полиизопрена. *Каучук и резина*. 2022. Т. 81. № 4. С. 190–193.

8. Tan L., Tan B. Hypercrosslinked porous polymer materials: design, synthesis, and applications. *Chemical Society Reviews*. 2017. V. 46. № 11. P. 3322–3356.
9. Королев Е.В., Смирнов В.А., Альбакасов А.И., Иноземцев А.С. Некоторые аспекты проектирования составов многокомпонентных композиционных материалов. *Нанотехнологии в строительстве: научный интернет-журнал*. 2011. Т. 3. № 6. С. 32–43.
10. Лесовик В.С., Загороднюк Л.Х., Чулкова И.Л., Толстой А.Д., Володченко А.А. Сродство структур как теоретическая основа проектирования композитов будущего. *Строительные материалы*. 2015. № 9. С. 18–22.
11. Гречников Ф.В., Арышенский В.Ю., Ерисов Я.А. Проектирование оптимальной кристаллографии структуры конструкционных материалов. *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. 2018. Т. 20. № 4-1(84). С. 5–12.
12. Бабешко В.А., Евдокимова О.В., Бабешко О.М., Рядчиков И.В. Метод проектирования неоднородных материалов и блочных конструкций. *Доклады Академии наук*. 2018. Т. 482. № 4. С. 398–402.
13. Трофимов Д.А., Шалгунов С.И., Симонов-Емельянов И.Д. Исследование физико-механических характеристик модифицированных эпоксидных матриц и армированных пластиков с использованием современных вычислительных комплексов для расчетов. *Пластические массы*. 2023. № 1–2. С. 39–41.
14. Тарнавский Г.А., Анищик В.С. Инструментарий panomod компьютерной поддержки проектирования наноструктурированных полупроводниковых материалов. *Вычислительные методы и программирование*. 2009. Т. 10. № 1. С. 34–50.
15. Бобрышев А.Н., Жарин Д.Е., Шафигуллин Л.Н., Гумеров М.И. Система автоматизированного проектирования полимерных наполненных композиционных материалов специального назначения. *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением*. 2009. № 8. С. 9–16.
16. Шевелев В.В. Прогнозирование долговечности пучка волокон при одноосном растяжении на основе термофлуктуационной модели их хрупкого разрушения. *Прикладная механика и техническая физика*. 2023. Т. 64. № 5(381). С. 194–204.
17. Карташов Э.М. Обобщенные модельные представления теории теплового удара. *Математическое моделирование*. 2023. Т. 35. № 8. С. 14–30.
18. Брехова К.А., Симонов-Емельянов И.Д., Пыхтин А.А. Проектирование структуры и составов стойких к горению полимерных композиционных материалов с наполнителями-антипиренами на основе гидроксида магния. *Тонкие химические технологии*. 2023. Т. 18. № 2. С. 109–122.
19. Дементьева А.Г., Коврига В.В. Влияние защитного диффузионного газового потока на свойства полиэтиленовых газопроводов. *Пластические массы*. 2023. № 1–2. С. 47.
20. Дешева Е.А., Гусаров М.В., Тверской В.А. Морфология и антимикробные свойства композиций поливинилбутирала и этиленпропиленового каучука с ароматическими спиртами. *Авиакосмическая и экологическая медицина*. 2022. Т. 56. № 3. С. 54–60.
21. Полунин С.В., Горбунова И.Ю., Кербер М.Л., Крючков И.А., Морозова П.А., Кравченко Т.П. Влияние кардового полисульфона на вязкоупругие свойства эпоксидных полимеров. Все материалы. *Энциклопедический справочник*. 2023. № 2. С. 38–41.
22. Bhushan B. Biomimetics inspired surfaces for drag reduction and oleophobicity/philicity. *Beilstein Journal of Nanotechnology*. 2011. V. 2. № 1. P. 66–84.
23. Bixler G.D., Bhushan B. Fluid drag reduction and efficient self-cleaning with rice leaf and butterfly wing bioinspired surfaces. *Nanoscale*. 2013. V. 5. № 17. P. 7685–7710.

24. Исаев Е.А., Первухин Д.В., Корнилов В.В., Тарасов П.А., Григорьев А.А., Рудяк Ю.В., Рытиков Г.О., Назаров В.Г. Количественная оценка зависимости адгезии тромбоцитов к фторированному полиэтилену от структурных характеристик его поверхности. *Математическая биология и биоинформатика*. 2019. Т. 14. № 2. С.420–429. doi: [10.17537/2019.14.420](https://doi.org/10.17537/2019.14.420)
25. Bixler G.D., Bhushan B. Bioinspired rice leaf and butterfly wing surface structures combining shark skin and lotus effects. *Soft Matter*. 2012. V. 8. № 44. P. 11271–11284.
26. Damodaran V.B., Murthy S.N. Bio-inspired strategies for designing antifouling biomaterials. *Biomaterials Research*. 2016. V. 20. № 1. P. 18.
27. Jaggessar A., Shahali H., Yarlagaadda P.K.D.V., Mathew A. Bio-mimicking nano and micro-structured surface fabrication for antibacterial properties in medical implants. *Journal of Nanobiotechnology*. 2017. V. 15. № 1. P. 64.
28. Li B., Pang Y.-J., Cheng Y.-X., Zhu X.-M. Collaborative optimization for ring-stiffened composite pressure hull of underwater vehicle based on lamination parameters. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*. 2017. V. 9. № 4. P. 373–381.
29. Li Yu., Zhang L., Zhang Ch., Zhang Zh., Liu L. Bioinspired antifouling fe-based amorphous coating via killing-resisting dual surface modifications. *Scientific Reports*. 2022. V. 12. № 1. P. 1–10.
30. Ferrario J., Caronni S., Occhipinti-Ambrogi A., Marchini A. Role of commercial harbours and recreational marinas in the spread of non-indigenous fouling species. *Biofouling*. 2017. V. 33. № 8. P. 651–660.
31. Quéré D. Wetting and roughness. *Annual Review of Materials Research*. 2008. V. 38. P. 71–99.
32. Serkhacheva N.S., Ryzhikov K.A., Prokopov N.I., Plutalova A.V., Bol'shakova A.V., Chernikova E.V. Seeded raft polymerization of styrene for the synthesis of stable dispersions of amphiphilic block copolymers and composite nanoparticles. *Polymer Science, Series B*. 2022. V. 64. P. 124–136.
33. Zuev A.A., Lyusova L.R., Kovaleva L.A., Boreiko N.P. The influence of filler on the properties of resin–metal compounds. *Polymer Science, Series D*. 2022. V. 15. № 2. P. 260–263.
34. Li S., Zhang S.-Q., Shen L., Liu Q., Ma J.-B., Lv W., He Y.-B., Yang Q.-H. Progress and perspective of ceramic/polymer composite solid electrolytes for lithium batteries. *Advanced Science*. 2020. V. 7. № 5. P. 1903088.
35. Seuyep N.D.H., Szopinski D., Luinstra G.A., Theato P. Post-polymerization modification of reactive polymers derived from vinylcyclopropane: a poly(vinylcyclopropane) derivative with physical gelation and ucst behaviour in ethanol-water mixtures. *Polymer Chemistry*. 2014. V. 5. № 19. P. 5823–5828.
36. Wang B., Wang X., Zheng H., Lam Y.C. Surface wettability modification of cyclic olefin polymer by direct femtosecond laser irradiation. *Nanomaterials*. 2015. V. 5. № 3. P. 1442–1453.
37. Liu X., Yang G., Lipik V. Permanent water repellent chemical modification of cotton fabric with reagents containing aromatic rings. *Fibers and Polymers*. 2019. V. 20. № 1. P. 51–56.
38. Wang R., Yang Y., Lu Y., Zhang M. A simple modification to improve the immunity of linear electromagnetic actuators against disturbing magnetic field. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2022. V. 550. P. 169125.
39. Vasilev A.P., Struchkova T.S., Nikiforov L.A., Okhlopkova A.A., Cho J.H., Grakovich P.N., Shim E.L. Mechanical and tribological properties of polytetrafluoroethylene composites with carbon fiber and layered silicate fillers. *Molecules*. 2019. V. 24. № 2. P. 0224.

40. Klimov V.V., Kolyaganova O.V., Bryuzgin E.V., Navrotsky A.V., Novakov I.A. Effect of the composition of copolymers based on glycidyl methacrylate and fluoroalkyl methacrylates on the free energy and lyophilic properties of the modified surface. *Polymers*. 2022. V. 14. № 10. P. 1960.
41. Annabi N., Shirzaei Sani E., Portillo-Lara R., Fares M.M., Rana D., Gifford J.L., Mithieux S.M., Weiss A.S. Engineering a sprayable and elastic hydrogel adhesive with antimicrobial properties for wound healing. *Biomaterials*. 2017. V. 139. P. 229–243.
42. Yu X., Zhao Y., Feng Y., Hu X., Liu J., Wang X., Wu M., Dong H., Liang Y., Wang W., Tian F. Synthesis and performance characterization of a road coal dust suppressant with excellent consolidation, adhesion, and weather resistance. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2022. V. 639. P. 128334.
43. Barati Darband G., Aliofkhazraei M., Sokhanvar S., Kaboli A., Khorsand S. Science and engineering of superhydrophobic surfaces: review of corrosion resistance, chemical and mechanical stability. *Arabian Journal of Chemistry*. 2020. V. 13. № 1. P. 1763–1802.
44. Tyagi A., Walia R.S., Murtaza Q., Pandey S.M., Tyagi P.K., Bajaj B. A critical review of diamond like carbon coating for wear resistance applications. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. 2019. V. 78. P. 107–122.
45. Sivkov D., Mingaleva A., Petrova O., Isaenko S., Bogachuk D., Skandakov R., Sivkov V., Nekipelov S., Ob'edkov A., Kaverin B., Vilkov I., Gusev S. The structure and chemical composition of the cr and fe pyrolytic coatings on the mwcnts' surface according to nexafs and xps spectroscopy. *Nanomaterials*. 2020. V. 10. № 2. P. 374.
46. Shen X.-J., Wen J.-L., Yuan T.-Q., Chen T., Wang H.-M., Sun S., Mei Q., Yue F., Sun R.-C. Structural and morphological transformations of lignin macromolecules during bio-based deep eutectic solvent (des) pretreatment. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*. 2020. V. 8. № 5. P. 2130–2137.
47. Rytikov G.O., Doronin F.A., Evdokimov A.G., Nazarov V.G., Savel'ev M.A. An approach to structural and functional modeling of the surface morphology of materials based on fluorinated polymers. *Russian Journal of General Chemistry*. 2021. V. 91. № 12. P. 2667–2672.
48. Rytikov G.O., Doronin F.A., Evdokimov A.G., Rudyak Y.V., Nazarov V.G. The effect of morphological surface inhomogeneities on the mycological resistance of polymer films. *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*. 2021. V. 57. № 2. P. 422–431.
49. Иванов В.В., Криволапова О.В., Белова Л.О., Кирилин А.Д. Сравнение активности оловоорганических соединений и сульфокислоты при получении сшитого полиэтилена. *Пластические массы*. 2013. № 2. С. 19–24.
50. Nazarov V.G., Stolyarov V.P., Kondratov A.P. Surface channel microstructures in polymer films for fluid transport. Proceedings of the World Congress on Mechanical, Chemical, and Material Engineering. *Proceedings of the World Congress on Mechanical, Chemical, and Material Engineering (MCM 2015)*. 2015. Article No. 242.
51. Павлова В.В., Соколова М.Д., Федорова А.Ф. Влияние содержания и природы пластификатора на свойства бутадиен-нитрильной резины. *Журнал Сибирского федерального университета*. Серия: Техника и технологии. 2021. Т. 14. № 2. С. 222–232.
52. Ольхов А.А., Карпова С.Г., Роговина С.З., Жорина Л.А., Курносков А.С., Иорданский А.Л. Влияние озона на структуру биоразлагаемых матриц на основе смесей поли(3-гидроксibuтирата), полилактида и хитозана. *Материаловедение*. 2022. № 4. С. 35–41.
53. Pogodin V.A., Astarov A.N., Eremkina M.S., Babaytsev A.V., Rabinskiy L.N. Investigation of the low-temperature oxidation effect on the structure and mechanical properties of C/C composite. *Nanoscience and Technology*. 2021. V. 12. № 3. P. 29–46.

54. Zhang T., Lan H., Yu Sh., Huang Ch., Du L., Zhang W. High-temperature solid lubricant coating by plasma spraying using metal-metal clad powders. *Journal of Thermal Spray Technology*. 2017. V. 26. № 6. P. 1268–1278.
55. Guo S., Neoh K.G., Jańczewski D., Zhu X., Quintana R., He T. Surface charge control for zwitterionic polymer brushes: tailoring surface properties to antifouling applications. *Journal of Colloid and Interface Science*. 2015. V. 452. P. 43–53.
56. Хоанг В.К., Резниченко С.В., Емельянов С.В., Доан В.Д., Резниченко Д.С. Исследование усиливающего действия диоксида кремния из рисовой шелухи вьетнама в эластомерных материалах на основе неполярных каучуков. *Каучук и резина*. 2022. Т. 81. № 4. С. 178–183.
57. Баранов А.В. Течение вязкой реагирующей жидкости через пористый наполнитель в плоском канале. *Пластические массы*. 2023. № 1–2. С. 42–43.
58. Volynskii A.L., Yarysheva L.M., Bagrov D.V., Rukhlya E.G., Yarysheva A.Y., Bakeev N.F., Nazarov V.G., Stolyarov V.P., Tsypysheva S.V. Evaluation of the deformation strength properties of a fluorinated polymer layer on the surface of poly(ethylene terephthalate) films. *Doklady Physical Chemistry*. 2012. V. 442. № 1. P. 5–7.
59. Севастьянов В.И., Немец Е.А., Столяров В.П., Баранов В.А., Божко Н.Н., Назаров В.Г. Сравнительное исследование влияния некоторых методов модификации поверхности пленок полиэтилена на взаимодействие с компонентами крови. *Перспективные материалы*. 2010. № 4. С. 41–48.
60. Doronin F., Rytikov G., Evdokimov A., Rudyak Yu., Taranets I. and Nazarov V. The effect of electro-induced multi-gas modification on polymer substrates' surface structure for additive manufacturing. *Processes*. 2023. V. 11. P. 774.
61. Doronin F.A., Rudyak Y.V., Rytikov G.O., Evdokimov A.G., Nazarov V.G. 3D-printed planar microfluidic device on oxyfluorinated PET-substrate. *Polymer Testing*. 2021. V. 99. P. 107209.
62. Доронин Ф.А., Савельев М.А., Таранец И.П., Рудяк Ю.В., Рытиков Г.О., Назаров В.Г. Вариационно-ротационная анизотропия как новый подход к количественной оценке степени морфологической гетерогенности поверхности полимерных материалов. *Российский химический журнал*. 2021. Т. 65. № 4. С. 8–15.
63. Liu S., Sang S., Wang W., Du Y., Wang T., Wang G., Ma J., Wang X. FIB-SEM and X-ray CT characterization of interconnected pores in high-rank coal formed from regional metamorphism. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2017. V. 148. P. 21–31.
64. Марков А.В., Лобанов В.Н. Оценка напряженного состояния поликарбонатных монолитных листов оптико-поляризационными методами. *Тонкие химические технологии*. 2022. Т. 17. № 1. С. 65–75.
65. Orekhov A.S., Klechkovskaya V.V., Kononova S.V. Low-voltage scanning electron microscopy of multilayer polymer systems. *Crystallography Reports*. 2017. V. 62. № 5. P. 710–715.
66. Петрушин В.Н., Рудяк Ю.В., Рытиков Г.О., Назаров В.Г. Построение бикритериально достоверных эмпирических распределений яркостей пикселей при количественном анализе СЭМ изображений. *Известия высших учебных заведений. Проблемы полиграфии и издательского дела*. 2017. № 5. С. 3–14.
67. Евдокимов А.Г., Доронин Ф.А., Савельев М.А., Рытиков Г.О., Назаров В.Г. Математическое моделирование морфологической структуры поверхностно модифицированных полимерных пленочных материалов. В: *Технологии и материалы для экстремальных условий (прогнозные исследования и инновационные разработки)*: материалы всероссийской научной конференции. Под ред. Б.Ф. Мясоедова. 2018. С. 216–220.

68. Rytikov G.O., Pervoukhin D.V., Nazarov V.G. A new approach to quantitative characterization of the material's surface morphological heterogeneity. *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2022. V. 210. P. 301–307.
69. Копачев Е.С., Ноздрачев С.А., Петрушин В.Н., Рудяк Ю.В., Рытиков Г.О., Назаров В.Г. Комплексный метод характеристики изображений поверхностей полимерных композитных материалов. *Физическая мезомеханика*. 2015. Т. 18. № 6. С. 98–110.
70. Drozdov S.A., Nazarov V.G., Nozdrachev S.A., Rudyak Yu.V., Rytikov G.O. The polymer composites' morphological structure simulation. *Nanosystems: Physics, Chemistry, Mathematics*. 2017. V. 8. № 1. P. 137–145.
71. Рытиков Г.О., Дедов А.В., Рудяк Ю.В., Назаров В.Г. Автоматизация процесса анализа СЭМ изображений поверхностных слоев волокнистых материалов. *Известия высших учебных заведений. Проблемы полиграфии и издательского дела*. 2017. № 5. С. 15–24.
72. Рытиков Г.О., Доронин Ф.А., Евдокимов А.Г., Савельев М.А., Назаров В.Г. Подход к структурно-функциональному моделированию морфологической структуры поверхности материалов на основе фторированных полимеров. *Российский химический журнал*. 2020. Т. 64. № 3. С. 63–68.
73. Rytikov G.O., Doronin F.A., Nagornova I.V., Rudyak Yu.V., Nazarov V.G., Varepo L.G. The automating of the quantitative analysis and characterization of the polymer based films surfaces SEM-images *J. Phys.: Conf. Ser.* 2020. V. 1546. P. 012027.
74. Gorbatov R.O., Malyshev E.E., Romanov A.D., Karyakin N.N. Total knee arthroplasty using virtual prototyping and additive manufacturing. *Modern Technologies in Medicine*. 2018. V. 10. № 3. P. 146–154.
75. Sevostyanov P.A., Samoiloва T.A., Tikhomirova M.L. Dry and viscous friction, statistical factors, fluctuation-dissipation theorem and features of their manifestations in relaxation of fibrous materials. *Fibre Chemistry*. 2020. V. 51. № 6. P. 449–451.
76. Bulgarevich S.B., Boyko M.V. Effective activation energies of chemical reactions and viscous flow of liquids depending on pressure in tribosystems with boundary and mixed friction. *Journal of Friction and Wear*. 2017. V. 38. № 2. P. 132–137.
77. Ngo T.D., Kashani A., Imbalzano G., Nguyen K.T.Q., Hui D. Additive manufacturing (3D-printing): a review of materials, methods, applications and challenges. *Composites Part B: Engineering*. 2018. V. 143. P. 172–196.
78. Lee J., Jang T.-S., Jung H.-D., Lee H., Cheon K.-H., Park C., Kim H.-E. Fabrication of poly(lactic acid)/ti composite scaffolds with enhanced mechanical properties and biocompatibility via fused filament fabrication (FFF)-based 3D printing. *Additive Manufacturing*. 2019. V. 30. P. 100883.
79. Доронин Ф.А., Савельев М.А., Таранец И.П., Рудяк Ю.В., Рытиков Г.О., Назаров В.Г. Вариационно-ротационная анизотропия как новый подход к количественной оценке степени морфологической гетерогенности поверхности полимерных материалов. *Российский химический журнал*. 2021. Т. 65. № 4. С. 8–15.

Рукопись поступила в редакцию 11.01.2024, переработанный вариант поступил 02.02.2024.
Дата опубликования 20.02.2024.

===== INFORMATION AND COMPUTER =====
===== TECHNOLOGIES IN BIOLOGY AND MEDICINE =====

A Biomimetic Approach to the Creation of Polymer Materials with Improved Tribological Properties

Grigoriev A.A.^{1,2}, Isaev E.A.³, Pervukhin D.V.⁴, Petrushin V.N.⁵,
Doronin F.A.⁴, Rudyak Yu.V.⁴, Rytikov G.O.^{4,5}, Nazarov V.G.⁴

¹*Financial University under the Government of the Russian Federation, Moscow, Russia*

²*K.G.Razumovsky Moscow State University of Technologies and Management, Moscow, Russia*

³*Keldysh Institute of Applied Mathematics of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

⁴*Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia*

⁵*Institute of Contemporary Art, Moscow, Russia*

Abstract. The work is devoted to the use of methods of applied mathematics and statistics for the formalization and mathematical modeling of the structure of shark skin as a prototype of new polymer materials for shipbuilding purposes. A technique for mathematical modeling of biological objects is described, and a method for using a biomimetic approach for the design of planar composite polymer materials with improved lyophilic adhesion properties is proposed. Because of studying images of shark skin obtained using high-resolution optical (HRO) and scanning electron (SEM) microscopy, we found that its texture is anisotropic. Quantitative analysis of BOM and SEM images made it possible to rationalize the choice of synthetic digital models intended for simulation prototyping of maximally and minimally texturally isotropic polymer samples using 3D printing and gas-phase surface modification.

Key words: *digital models, creation of materials, scanning electron microscopy, nature similarity, biomimetics, image analysis, two-dimensional Fourier series, tribological properties.*