

# ПРИКЛАДНА ГЕОМЕТРІЯ, ІНЖЕНЕРНА ГРАФІКА ТА ЕРГОНОМІКА

УДК 514.18: 678.5.05:004.925.8

**Колосова Е.П.**

Национальный технический университет Украины  
«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»

**Ванин В.В.**

Национальный технический университет Украины  
«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»

**Колосов А.Е.**

Национальный технический университет Украины  
«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»

## НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ ГЕОМЕТРИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ И ПРОЦЕССОВ ФОРМОВАНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ.

### 1. Моделирование структуры ориентированных макроволоконистых композитов

*Проанализированы вопросы геометрического моделирования технических объектов и процессов формования полимерных композитов на примере анализа подходов к моделированию структуры ориентированных макроволоконистых композитов. На базе структурных параметров модели проводится прогнозирование конструкторско-технологических параметров технических средств для получения армированных реактопластов.*

**Ключевые слова:** моделирование, геометрия, структура, макроволокно, полимер, композит, реактопласт, объект, процесс.

**Постановка проблемы.** К настоящему времени в мире накоплен значительный опыт в области проектирования реактопластичных полимерных композиционных материалов (далее – ПКМ) функционального назначения. Основными структурными элементами таких материалов являются полимерная матрица, выполняющая связующую роль, и армирующий наполнитель, воспринимающий основную нагрузку в силовом композите.

При этом возрастает роль пространственно-армированных ПКМ на основе ориентированных (однонаправленных) (макро)волоконистых наполнителей (далее – ОВН). Преимущественные объекты их применения – легковесные ответственные (высоконагруженные) детали летательных, в т. ч. космических, аппаратов и механических силовых устройств (сосуды высокого давления, аппараты химических производств и др.); изделия «специального» (двойного) назначения (бронежилеты повышенной степени защиты, костюмы

с вплетенными в армирующую ткань нагревателями), перекрестно армированные глубоководные аппараты и др.

Разработка и внедрение пространственно-армированных материалов базируется на развитии и практической реализации соответствующих теорий. Причем эти теории имеют отличительные особенности для моделирования ПКМ на базе макро- и микронаполнителей. В то же время эти теории являются базисом для разработки реализующих их технологий.

Не претендуя на всеобъемлющее исследование, в настоящей работе представляем анализ только некоторых перспективных подходов к решению данной проблемы с точки зрения эффективности применения геометрического моделирования структуры ОВН.

**Постановка задания.** Целью статьи является краткий аналитический обзор особенности применения геометрического моделирования

структуры ориентированных макроволоконистых реактопластичных композитов, используемой для прогнозирования конструкторско-технологических параметров формования реактопластов, в частности процессов капиллярной пропитки и намотки.

**Изложение основного материала исследования.** Несмотря на значительный прогресс, достигнутый в области проектирования макроволоконистых реактопластичных ПКМ, моделирование их структуры является исключительно сложной научно-технической проблемой по ряду причин, связанных с особенностями их структурной организации. Причем до сих пор отсутствуют достаточно четкие теоретические представления, включая математические зависимости и соответствующие методики, позволяющие с достаточной степенью точности прогнозировать геометрические параметры адекватных структурных моделей таких материалов.

Такие модели используются, в частности, для прогнозирования конструктивно-технологических параметров технических средств формования ПКМ. В связи с этим при проектировании таких материалов с целью уменьшения материально-временных затрат применяют целый спектр методов моделирования: математическое, экспериментально-статистическое, компьютерное. При этом среди указанных методов моделирования геометрическому моделированию, работающему в «связке» с математическим моделированием, принадлежит одна из главных ролей.

Ниже рассмотрены некоторые подходы (как существующие, так и разработанные) к решению рассматриваемой проблемы, в т. ч. с применением современной методологии автоматизированного проектного моделирования.

*Моделирование структуры однонаправленных макроволоконистых полимерных композитов.* Согласно общепринятой концепции, различают два базовых подхода к проектированию конструктивно-технологических параметров технических средств формования и расчету элементов конструкций композитов на основе ОВН: феноменологический и структурный [1].

В рамках реализации первого подхода композит рассматривается как цельный материал с некоторым тензором приведенных упругих (вязко-упругих) характеристик. Второй подход базируется на предположении о гетерогенности свойств анализируемого континуума, который содержит цилиндрические включения (макроволоконна) произвольного сечения.

Первый подход из-за простоты его предпосылок более распространен. В то же время он может рассматриваться лишь как приближенный. Это обусловлено тем, что свойства составляющих структурных элементов композитов на основе ОВН различаются между собой весьма значительно (например, на порядок и более). Поэтому приведенные (усредненные) физико-механические константы такой монолитной системы часто теряют физический смысл. В то же время второй подход позволяет более адекватно моделировать параметры технологии, а также прогнозировать напряженно-деформированное состояние конструкций с учетом конкретного вида нагружения. Это обусловлено учетом реальной структуры исследуемых композитов на основе ОВН.

Так, например, при моделировании параметров базовых технологических процессов формования ПКМ, в частности процессов капиллярной пропитки и намотки, для описания переноса пропиточной жидкости в структуре ОВН используются и развиваются новые модельные физико-математические и процедурно-компьютеризованные подходы. Последние реализуются с использованием геометрических (структурных) моделей [2]. В настоящее время это прежде всего:

1) *структурно-сетевые модели* пористых и корпускулярных сред различных структур – «Pore Network Models» (случайные, регулярные и пр. решетки и регулярные упаковки);

2) методология и математический аппарат теории перколяции (percolation – пропитка или просачивание жидкостей через пористые материалы); для данных процессов – это рассмотрение условий переноса пропиточной жидкости в зависимости от статистических характеристик решеток, моделирующих дисперсные или пористые среды – аналог ОВН (перколяция по связям, перколяция по узлам) [3; 4];

3) *кластерный анализ* (cluster – пучок, связка) – статистическое выявление обособленных структур [5]; в задачах переноса (пропитка ОВН жидкими полимерными связующими) изучаются объединения – кластеры проводящих (или пропитываемых) участков, частиц, молекул и проч., их размеры, характеристики и связь с переносными свойствами жидкой среды;

4) *фрактальный анализ* – «Fractal Theory» (fractus – дробленный) – моделирование и изучение свойств геометрических элементов (линий, поверхностей, объемных образований), учитывающее изменение геометрических величин (длины, площади, объема) при изменении масштаба изме-

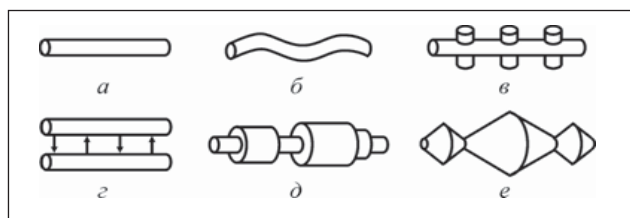
рения [6]. При этом часто все вышеперечисленные четыре подхода используются совместно.

Волокнистую структуру капиллярно-пористых тел в общем случае нельзя рассматривать как простую сумму линейных капилляров с одинаковым поперечным сечением. На практике капилляры в волокнистых системах существенно отличаются от цилиндрических трубок [7; 8]. К тому же, как правило, капилляр не является круглым, а его стенки – гладкими.

Рассматривая структуру ОВН как капиллярно-пористое тело, следует также учитывать, что форма и площадь поперечного сечения реальных капилляров могут изменяться в широких пределах по его длине [7; 8]. Кроме того, капилляры могут разветвляться, смыкаться, заканчиваться тупиками или порами большого объема [9]. Это предопределяет необходимость более подробного рассмотрения структурных моделей капиллярно-пористых тел.

Структура капиллярно-пористых тел чрезвычайно разнообразна. Общим для них является наличие твердой фазы и системы пустот в виде каналов и полостей. Твердую фазу таких тел называют скелетом (каркасом) тела, а систему пустот – пространством пор. Объемная доля пустот – это пористость  $\varepsilon$ , поверхность пустот – внутренняя поверхность, а ее величина, отнесенная к единице объема тела – удельная поверхность  $S_{уд}$  [3; 4].

Капиллярные модели представляют собой пространство пор в виде системы каналов с определенными геометрическими свойствами. На рис. 1 приведены некоторые (наиболее часто используемые) структурно-сетевые модели капиллярных тел в виде одномерных моделей [2].



**Рис. 1. Простейшие капиллярные модели пористых тел [2]: а – прямой канал; б – извилистый канал; в – канал с отходящими тупиковыми порами; г – система параллельных каналов с идеальной связью; д – серийная модель; е – периодический гофрированный канал**

В модели одинаковых *прямых каналов* (рис. 1а) основные параметры модели – объемная доля каналов и их диаметр. В модели одинаковых *параллельных извилистых каналов* (рис. 1б) вводится дополнительный параметр искривленности капилляров – коэффициент извилистости  $\beta_0$ .

Для учета *застойных (тупиковых) зон* (аналог «бутылочного» эффекта) в пористых материалах и их влияния на дисперсию примеси применяют модель канала с тупиковыми порами-ответвлениями (рис. 1в). Для учета влияния тупиковых пор вводится дополнительная величина – объемная доля тупиковых пор. В тех случаях, когда фильтрация жидкости моделируется неоднородной задачей и возникает дополнительный перенос жидкости поперек каналов, применяют модель каналов, связанных друг с другом развитой системой микропор (рис. 1г). Такая идеализация получила название модели параллельных капилляров с *идеальной связью*.

В *серийных моделях* (рис. 1д) учитывают переменность сечения пор, т. е. наличие сужений и расширений вдоль длины. Диаметр капилляра в серийных моделях меняется скачкообразно. *Гофрированные капилляры* (рис. 1е), в отличие от серийных моделей, имеют диаметр, непрерывно изменяющийся по длине. Заменяя пространство пор системой одномерных каналов, в общем случае можно учесть извилистость, гофрированность пор, их различные размеры и форму, а также наличие застойных зон. В то же время такие важные свойства пористых тел, как взаимосвязь отдельных капилляров и пересеченность пространства пор, практически не учитываются. Поэтому система одномерных капилляров может быть использована для адекватного описания капиллярных явлений только для идеализированных случаев.

Поэтому считается, что решетчатые модели наиболее полно отражают пространственную структуру пористых сред, а также взаимосвязь составляющих их элементов. На рис. 2 представлены некоторые *модели регулярных (квазирегулярных) решеток*.

Модель квадратной решетки, в узлах которой расположены частицы различной формы (рис. 2а), может быть использована, например, для описания процессов пропитки и фильтрации в пористых средах, образованных дисперсными макро-частицами.

Для описания подобных процессов в пористых средах, состоящих из частиц, применяют бидисперсные модели пористых сред (рис. 2б). Такие модели применимы, например, для описания процессов, протекающих в зернах катализатора (микропористых тел в зернистом слое). Еще одним примером применения таких моделей является описание процесса экстрагирования растительных тканей, характеризующихся регулярной структурой микро- и макропор.

При изготовлении ПКМ на базе перекрестно-армированных ОВН, например, стеклотекстолитов, в качестве стекловолоконного армирующего наполнителя применяют различные виды стеклотканей сатинового, саржевого и полотняного переплетения [10] (см. рис. 3).

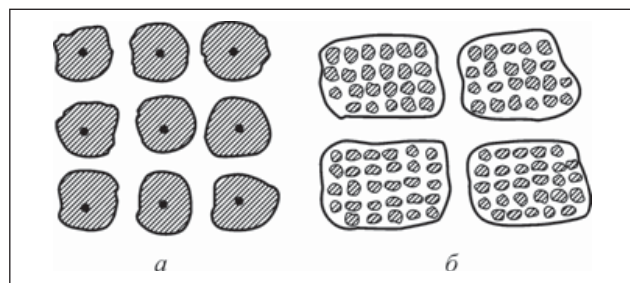


Рис. 2. Решетчатые регулярные модели [2]:  
а – система частиц в узлах решетки;  
б – бидисперсная модель

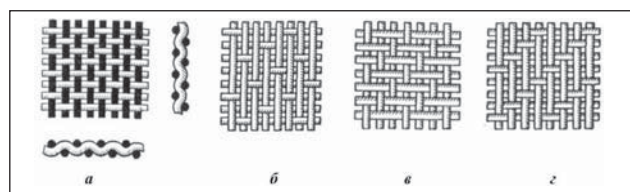


Рис. 3. Некоторые виды переплетения тканей [10]: а – полотняное; б – сатиновое; в и г – саржевое (ткани типа 1/2 и 3/1)

Структуру переплетения таких тканей можно представить как линейной моделью (в случае пропитки только одного слоя ткани, что наиболее часто и происходит на практике), так и регулярной решетчатой моделью (в случае одновременной пропитки нескольких расположенных один над другим слоев ткани либо стекломата). Также следует отметить, что для структуры таких армирующих тканей (см. рис. 3) характерна *симметрия*.

В общем случае представления о капиллярно-пористых средах намного шире описанных выше. Причем, чем сложнее структурная модель таких тел, тем сложнее ее геометрическая модель и математическое моделирование процессов переноса жидкой среды в ней. Поэтому следует находить некий баланс при выборе адекватной геометрической (структурной) модели капиллярно-пористых тел для конкретного технологического процесса. При этом необходимо учитывать как структуру реально используемого капиллярно-пористого тела, так и свойства пропитывающей жидкости.

**Некоторые подходы к определению параметров адекватной геометрической модели ОВН.**

Например, при детерминировании параметров кинетического уравнения процесса «свободной» капиллярной пропитки [2–4; 9] необходимо корректное нахождение структурных характеристик ОВН на базе его адекватной геометрической модели. В качестве таких характеристик рассматривают пористость  $\varepsilon$ , удельную внутреннюю поверхность  $S_{\text{во}}$ , а также эффективный (гидравлический) капиллярный радиус  $r_{\text{эф}}$  ОВН.

Так, было разработано четыре подхода к определению параметров геометрической модели структуры ОВН, в т. ч. эффективного (гидравлического) капиллярного радиуса  $r_{\text{эф}}$  [7; 8]. Первый из них – на основе микроструктурного анализа сечения шлифа эпоксидного композита на основе ОВН. Второй – определение  $r_{\text{эф}}$  на основе анализа типичной кинетической кривой процесса «свободной» пропитки. Третий – определение  $r_{\text{эф}}$  расчетным путем для модельного случая предельно уплотненного ОВН круглого сечения (для гексагональной упаковки волокон). Четвертый – определение  $r_{\text{эф}}$  ОВН в зависимости от усилия его натяжения  $N$  при пропитке.

Краткое описание вышеупомянутых подходов (№ 3 – № 4) можно найти в работах [7; 8]. В то же время первый из указанных подходов заслуживает отдельного рассмотрения, что и делается далее.

*Первый подход* применим для определения структурных характеристик как для оптически прозрачных, так и оптически непрозрачных (например, металловолконистых) ориентированных композиционно-волоконистых сред. Этот подход базируется на экспериментальном исследовании микроструктуры этих затвердевших сред и построении соответствующих кривых распределения, характеризующих эту микроструктуру.

Прежде всего адекватная модель структуры ОВН должна учитывать *стохастический характер* распределения волокон в структуре композита [11; 12]. По найденным параметрам геометрической модели структуры ОВН в оптимуме проводится выбор оптимальной схемы армирования и отработка рациональной технологии на этапе проектирования конструкции. Также осуществляется прогноз напряженно-деформированного состояния конструкции с учетом характера действующей нагрузки [11–13].

Вариантом представлениям структуры ОВН является геометрическая модель структуры капиллярно-пористого тела, которая состоит из системы параллельно-извилистых капилляров различных радиусов. Ее можно формализовать



зовать с помощью функции распределения пор радиусом  $\rho$  по размерам  $\varphi(\rho)$ .

Разработанный подход к определению эффективного капиллярного радиуса  $r_{эф}$  ОВН состоит в следующем. Делают микрошлиф сечения ПКМ в поперечном направлении и экспериментально исследуют распределение длин экстхорд волокон или функцию распределения  $\varphi(\rho) = G(\ell)$  пор по размерам  $\ell$ . При этом «экстхорды» обозначают расстояния между волокнами в сечении композита (т. е. эквивалентный диаметр, или удвоенный радиус  $r_{эф}$  пор). В общем случае длины экстхорд носят случайный характер.

При выполнении условия наилучшего приближения теоретической и экспериментальной кривых распределения вычисляют пористость  $\varepsilon$ , удельную внутреннюю поверхность  $S_{yd}$  и эффективный (эквивалентный) капиллярный радиус  $r_{эф}$  искомого ОВН как капиллярно-пористого тела с помощью функции распределения длин экстхорд  $\varphi(\rho) = G(\ell)$ .

Для предельно армированных ПКМ на основе ОВН применяется геометрическая модель среды Г.А. Ванина. Последняя репрезентована системой круговых цилиндрических волокон, оси которых параллельны и расположены в узлах элементарной ячейки (двоякопериодической решетки параллелограммов). Пространство между волокнами заполнено связующей средой, а сечения волокон не должны накладываться друг на друга [11].

Элементарные ячейки такой геометрической модели изображены на рис. 4. Плоскость шлифа исследуемого композита на базе ОВН моделируется двоякопериодическим продолжением элементарной ячейки.

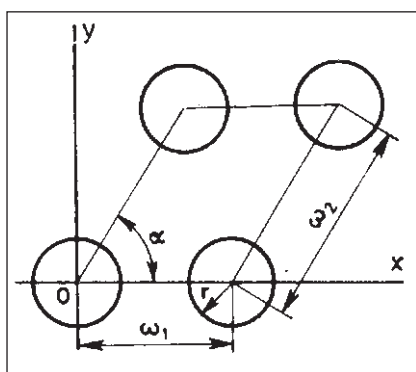


Рис. 4. Адекватная геометрическая модель ОВН с равновеликими узловыми окружностями [11]

В качестве параметров упаковки цилиндрических волокон выбраны длины его сторон  $\omega_1$  и  $\omega_2$  и угол между ними  $\alpha$ . Единицей измерения расстояний в модельной плоскости для удобства при-

нята базовая длина стороны элементарной ячейки  $\omega_1$ . Критерием адекватности структурной модели исследуемого композита служит совпадение с определенной степенью точности (на практике составляющей не менее 90%) коэффициентов и вероятностных характеристик кривых распределений длин хорд окружностей и расстояний между соседними волокнами (экстхорд).

Также в указанных пределах достоверности должны находиться величины «пористости»  $\varepsilon$  и относительного содержания связующего в модельной плоскости и в натурном композите на базе ОВН соответственно.

Указанные величины определяются в результате замеров, проводимых вдоль случайной секущей прямой. Последняя «бросается» случайным образом в модельной плоскости и в плоскости микрошлифа поперечного сечения натурной оболочечной конструкции [13]. Для репрезентативности получаемых кривых распределений параметры секущей прямой  $Y_d = \kappa X + D$ , а именно угол наклона  $\beta$  и свободный член  $D$  являются случайными величинами, равномерно распределенными в интервале  $(0, 1)$ . Т. е. выполняется условие  $\beta, D = var$ .

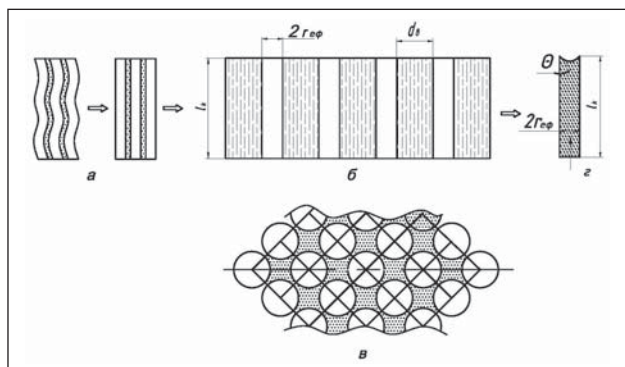
Методика получения модельных и экспериментальных кривых распределений описана в работах [15; 16]. Следует отметить, что получение экспериментальных кривых распределений является весьма трудоемкой процедурой. А параметры случайной секущей для случая  $\beta, D = var$  выбираются на основании результатов реализации алгоритма генерирования псевдослучайных чисел по методу Монте-Карло в интервале  $(0, 1)$ .

Методика детерминирования параметров адекватной геометрической модели структуры ОВН (см. рис. 6а – 6д), заключается в следующем [14]. От модели структуры ОВН, которая состоит из системы параллельно-извилистых капилляров различных радиусов (рис. 6а), и которая детерминируется с помощью функции распределения пор радиусом  $\rho$  по размерам  $\varphi(\rho)$ , переходят с помощью прогностических аналитических соотношений [14] к осреднению структуры ОВН как регулярной структуры линейных капилляров с одинаковым продольным сечением (рис. 6б).

Схема заполнения пропиточной жидкостью последних показана на рис. 6в, 6г (поперечное сечение ОВН). Т. е. в результате переходят к схеме пропитки единичного капилляра длиной  $\ell$  (рис. 6д), диаметр которого равен  $2r_{эф}$ .

Следует отметить, что описанный выше подход к построению модельных кривых распределений (полученных как аналитически, так и в результате

численного эксперимента) длин хорд и экстрорд в структуре ОВН был заимствован из теории *интегральной геометрии и геометрических вероятностей* [15; 16] и адаптирован к ОВН в работах [17–19].



**Рис. 5.** Иллюстрация реализации методики построения (а – д) адекватной геометрической модели микроструктуры ОВН в технологии их «свободной» пропитки жидким эпоксидным связующим:  $r_{эф}$  – эффективный капиллярный радиус;  $d_s$  – средний диаметр волокна;  $\theta$  – краевой угол смачивания [19].

Эта теория находит все большее применение для решения ряда прикладных задач. В рамках этой теории изучают геометрические объекты случайного характера (точечных полей, прямых, мозаик и т. п.), которые инвариантны относительно групп преобразований пространства.

В частности, в теории геометрических вероятностей изучают выпуклые фигуры, которые пересекаются случайными прямыми. Причем эти фигуры могут иметь общую форму, быть или выпуклыми, или кругами. Основной используемый метод предполагает размещение на исследуемую область случайной прямой длиной  $L$ , т. н. секущей. После этого измеряются пересечения с фигурами, которые не имеют общих точек.

В дальнейшем рассмотренная выше геометрическая модель структуры ОВН (рис. 5) используется для детерминации параметров уточненной математической модели технологического процесса «свободной» пропитки ОВН эпоксидными связующими. Это проводится на базе использования классической теории фильтрации для ламинарного течения вязкой несжимаемой неньютоновской жидкости в капиллярно-пористом теле.

Различные вопросы геометрического моделирования структуры ориентированных макроволоконистых реактопластичных композитов, используемой для прогнозирования конструкторско-технологических параметров формирования реактопластов, в частности процессов «свободной» капиллярной пропитки и намотки, а также для расчета их напряженно-деформированного состояния, описаны в [17–19], а также в [20].

Геометрические схемы пространственно армированных макроволокнами структур с различной структурой армирования представлены в справочнике [21]. В частности, рассмотрено влияние структурных (схем армирования) и технологических параметров (свойств арматуры и полимерной матрицы) на характеристики (эксплуатационные свойства) отвержденных композиционных материалов на их основе.

Отметим также, что при геометрическом моделировании таких структур, а также характера приложенных усилий и возникающих при этом напряжений в зависимости от напряженно-деформированного состояния, эффективным методом является использование *принципов симметрии* [22].

**Выводы.** Выполнен краткий аналитический обзор особенности применения геометрического моделирования структуры ориентированных макроволоконистых реактопластичных композитов, используемой для прогнозирования конструкторско-технологических параметров формирования реактопластов, в частности капиллярной пропитки и намотки. Предложена геометрическая модель стохастической структуры ОВН, которая построена на базе аппарата теории геометрических вероятностей и интегральной геометрии. Модель учитывает интегральные характеристики ОВН как капиллярно-пористого тела, а именно: пористость, удельный внутреннюю поверхность, эффективный (эквивалентный) капиллярный радиус. Параметры модели детерминируются с использованием аппарата теории геометрических вероятностей и интегральной геометрии. Перспективы дальнейших исследований заключаются в диссеминации описанных подходов на типичные структурные модели ориентированных композитов.

#### Список литературы:

1. Кристенсен Р. Введение в механику композитов: монография. М.: Мир, 1982. 336 с.
2. Коновалов В.И., Кудра Т., Гатапова Н.Ц. Современные вопросы теории переноса при сушке. Вестник Тамбовского государственного технического университета. 2008. Т. 14. № 3. С. 538–559.
3. Хейфец Л.И., Неймарк А.В. Многофазные процессы в пористых средах: монография. М.: Химия, 1982. 320 с.

4. Чизмаджев В.С. Маркин М.Р. и др. Макрокинетика процессов в пористых средах: монография. М.: Наука, 1971. 364 с.
5. Ким Дж.О., Мьюллер Ч.У., Клекка У.Р., Олдендерфер М.С., Блэшфилд Р.К. Кластерный анализ. Факторный, дискриминантный и кластерный анализ / пер. с англ. под. ред. И.С. Енюкова. М.: Финансы и статистика, 1989. 215 с.
6. Федер Е. Фракталы: монография. М.: Мир, 1991. 254 с.
7. Колосов О.Є. До вибору фізичної моделі капілярно-пористого середовища на основі орієнтованих волокнистих наповнювачів. Вісник НТУУ «КПІ». Серія «Машинобудування». 2010. № 59. С. 96–101.
8. Колосов О.Є. Аналіз структурних моделей капілярно-пористих тіл. Вісник НТУУ «КПІ». Серія «Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження». 2010. № 1 (5). С. 13–16.
9. Аксельруд Г.А., Альтшулер М.А. Введение в капиллярно-химическую технологию: монография. М.: Химия, 1983. 264 с.
10. Шалун Г.Б., Сурженко Е.М. Слоистые пластики: монография. Л.: Химия, 1978. 232 с.
11. Ван Фо Фы Г.А. Теория армированных материалов с покрытиями: монография. К.: Техніка, 1971. 232 с.
12. Иванченко Ф.К., Клявлин В.В., Колосов А.Е. Принципы построения модели структуры в теории армированных композиционных сред. Доклады АН УССР. Серия А. 1987. № 8. С. 25–29.
13. Kolosov A.E., Klyavlin V.V. Several aspects of determination of the adequate model of the structure of oriented fiber-reinforced composites. Mech. of Compos. Mater. 1989. Vol. 24. Is. 6. P. 751–757. DOI: 10.1007/BF00610779.
14. Колосова О.П., Ванін В.В., Вірченко Г.А., Колосов О.Є. Моделювання процесів виготовлення реактопластичних композиційно-волокнистих матеріалів: монографія. К.: ВПК «Політехніка» НТУУ «КПІ», 2016. 164 с.
15. Кендалл М. Дж., Моран П. Геометрические вероятности: монография. М.: Наука, 1972. 192 с.
16. Сантало Л.А. Интегральная геометрия и геометрические вероятности: монография. М.: Наука, 1983. 360 с.
17. Колосов О.Є. Одержання високоякісних традиційних та наномодифікованих реактопластичних полімерних композиційних матеріалів: монографія. К.: ВПК «Політехніка», 2015. 227 с.
18. Колосов О.Є., Сівецький В.І., Колосова О.П. Одержання волокнистонаповнених реактопластичних полімерних композиційних матеріалів із застосуванням ультразвуку: монографія. К.: ВПК «Політехніка», 2015. 295 с.
19. Колосова О.П., Ванін В.В., Колосов О.Є., Сівецький В.І. Моделювання процесів та обладнання для виготовлення реактопластичних матеріалів: монографія. К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. 235 с.
20. Kolosov A.E., Virchenko G.A., Kolosova E.P., Virchenko G.I. Structural and technological design of ways for preparing reactoplastic composite fiber materials based on structural parametric modeling. Chem. and Petrol. Eng. 2015. Vol. 51. Is. 7–8. P. 493–500. DOI: 10.1007/s10556-015-0075-3.
21. Тарнопольский Ю.М., Жигун И.Г., Поляков В.А. Пространственно-армированные композиционные материалы: справочник. М.: Машиностроение, 1987. 224 с.
22. Стюарт Иэн. Истина и красота. Всемирная история симметрии: монография / пер. с англ. Ал. Семихатова. М.: Астрель, Корпус, 2010. 461 с.

## ДЕЯКІ АСПЕКТИ ГЕОМЕТРИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ТЕХНІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ І ПРОЦЕСІВ ФОРМУВАННЯ ПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИТІВ.

### 1. МОДЕЛЮВАННЯ СТРУКТУРИ ОРІЄНТОВАНИХ МАКРОВОЛОКНИСТИХ КОМПОЗИТІВ

*Проаналізовано питання геометричного моделювання технічних об'єктів і процесів формування полімерних композитів на прикладі аналізу підходів до моделювання структури орієнтованих макрОВОЛОКНИСТИХ композитів. На базі структурних параметрів моделі проводиться прогнозування конструкторсько-технологічних параметрів технічних засобів для одержання армованих реактопластів.*

**Ключові слова:** моделювання, геометрія, структура, фрактал, дисперсний наповнювач, полімер, композит, реактопласт, термопласт, об'єкт, процес.

## SOME ASPECTS OF GEOMETRICAL MODELING OF TECHNICAL OBJECTS AND PROCESSES FOR FORMING POLYMER COMPOSITES.

### 1. MODELING OF THE STRUCTURE OF ORIENTED MACRO-FIBER COMPOSITES

*The problems of geometrical modeling of technical objects and processes of forming polymer composites on the example of analysis of approaches to modeling the structure of oriented macro-fiber composites are analyzed. On the basis of structural parameters of the model, forecasting of design and technological parameters of technical means for obtaining reinforced thermosets is carried out.*

**Key words:** modeling, geometry, structure, fractal, disperse filler, polymer, composite, thermoset, thermoplastic, object, process.