

УДК 678.021

СОЗДАНИЕ НАПОЛНЕННЫХ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ С РАЗНЫМИ ТИПАМИ ДИСПЕРСНОЙ СТРУКТУРЫ, ИХ КЛАССИФИКАЦИЯ И СВОЙСТВА

© 2022 г. И. Д. Симонов-Емельянов^а, К. И. Харламова^а, *, А. А. Пыхтин^а

^аФедеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования “МИРЭА – Российский технологический университет” (Институт тонких химических технологий имени М. В. Ломоносова), Москва, Россия

*e-mail: kharlamki@gmail.com

Поступила в редакцию 26.11.2021 г.

После доработки 06.05.2022 г.

Принята к публикации 07.05.2022 г.

В статье приводятся данные о построении дисперсных структур дисперсно-наполненных полимерных композиционных материалов по обобщенным (Θ , V и M) и приведенным параметрам (Θ/V и Θ/S_n), которые учитывают основные положения теории Пригожина–Де Жена по формированию гетерогенности и функциональное деление полимерной матрицы на три составляющие: Θ – доля полимерной фазы-матрицы (связующее) для образования прослойки между частицами наполнителя; V – доля полимерной фазы-матрицы (связующее) для заполнения объема между частицами с прослойками; M – доля полимерной фазы-матрицы (связующее) в граничных слоях с толщиной (δ). Приведены основные характеристики дисперсной фазы, а также деление дисперсных частиц на группы по размеру: наночастицы, ультрадисперсные частицы, микрочастицы, макрочастицы и крупные частицы. Предложена классификация дисперсно-наполненных полимерных композиционных материалов по структурному принципу (разбавленные, низко-наполненные, средне-наполненные: до предела текучести и с пределом текучести, высоконаполненные и сверх высоконаполненные системы) и схема формирования разных типов структур дисперсно-наполненных полимерных композиционных материалов. Представлены формулы для расчета обобщенных (Θ , V и M) и (Θ/V и Θ/S_n) приведенных параметров, а также значения параметра максимального содержания дисперсного наполнителя φ_m для дисперсных частиц разного размера и формы (шарообразных твердых крупных частиц, коротких жестких волокон, газообразных частиц, пластичных частиц). Содержание дисперсного наполнителя рассчитывают, что гарантирует формирование заданного типа структуры в дисперсно-наполненных полимерных композиционных материалах. Установлено, что технологические и эксплуатационные свойства определяются типом и параметрами гетерогенной гетерофазной структуры дисперсно-наполненных полимерных композиционных материалов.

Ключевые слова: композиционные материалы, дисперсная структура, обобщенные параметры структуры, содержание дисперсного наполнителя

DOI: 10.31857/S0040357122050219

ВВЕДЕНИЕ

В многочисленных монографиях и научных статьях, посвященных дисперсно-наполненным полимерным композиционным материалам часто используется понятие высоконаполненные полимерные материалы, при этом авторы не приводят какие-либо параметры структуры, подтверждающие этот тезис, а содержание дисперсного наполнителя приводят в массовых единицах [1–5].

Параметр – содержание (φ_n) дисперсной фазы (наполнителя) в дисперсно-наполненных полимерных композиционных материалах, который практически всегда предлагают авторы работ, не

является структурным параметром и не позволяет оценивать построение структуры в реальных дисперсно-наполненных полимерных материалах.

Параметр φ_n [6, 7] только указывает на долю дисперсной фазы в дисперсно-наполненных полимерных композиционных материалах (в объемных единицах – об. д. или об. %) и не учитывает форму, размер, распределение частиц по размерам и упаковку дисперсных частиц.

Остается неясным, с какими типами дисперсной структуры дисперсно-наполненных полимерных композиционных материалов работали исследователи? В этом случае не удастся связать технологические и эксплуатационные характери-

стики наполненных полимерных материалов с параметрами дисперсной структуры.

ПРИНЦИПЫ СОЗДАНИЯ ДНПКМ

В работах [8, 9] было показано, что форма и размер дисперсных частиц наполнителя существенно влияют на их упаковку в объеме.

В связи с этим выполненные работы по анализу построения дисперсных структур [6, 8–10] уже сегодня позволяют четко на количественном уровне рассчитать обобщенные и приведенные параметры дисперсных структур различных типов и дать классификацию по структурному принципу всех дисперсно-наполненных полимерных композиционных материалов.

В основу создания гетерогенных гетерофазных монолитных дисперсно-наполненных полимерных композиционных материалов для описания построения гетерогенной фазы (φ_n) положены фундаментальные положения теории решеток и перколяции Пригожина–Де Жена [6–9], а также деление полимерной матрицы (связующего) на три функциональные составляющие – Θ , B и M ($\varphi_n = \Theta + B + M$), причем состав материала можно записать как: $\varphi_n + \Theta + B + M = 1$ [6, 8, 9].

Таким образом, для классификации дисперсно-наполненных полимерных композиционных материалов по структурному принципу необходимы параметры, которые бы одновременно учитывали как построение гетерогенности с учетом формы, размера, распределения частиц по размерам и упаковки дисперсных частиц, так и трех составляющих ($\Theta + B + M$) полимерной матрицы.

Обобщенная модель дисперсно-наполненных полимерных композиционных материалов представлена в работе [8], в которой приведены необходимые основные характеристики дисперсной фазы (наполнителя), а также формулы для расчета обобщенных и приведенных параметров дисперсной структуры.

Основные характеристики дисперсной фазы (наполнителя) для построения гетерогенности в структуре дисперсно-наполненных полимерных композиционных материалов приведены ниже:

– форма частиц – коэффициент формы частиц – k_e ;

– размер частиц – диаметр – d или диаметр эквивалентной сферы – $d_{эс}$;

– для коротких волокон – диаметр (d), длина (L) и критическая длина волокна ($L_{кр}$);

– распределение частиц по размерам (дифференциальная или интегральная кривые распределения частиц) – гранулометрический состав наполнителя;

– удельная поверхность наполнителя – $S_{уд}$ (общая – $S_{об}$, внутренняя – $S_{вн}$ и геометрическая – S_r);

– шероховатость поверхности и пористость частиц наполнителя (суммарный объем пор – $V_{п}$, размер пор, радиус – r);

– упаковка частиц ($k_{уп}$) и максимальная доля наполнителя в дисперсно-наполненных полимерных композиционных материалах – φ_m ;

– плотность частиц: истинная – $\rho_{ист}$, кажущаяся – $\rho_{каж}$ и насыпная – $\rho_{нас}$.

Уровень гетерогенности дисперсно-наполненных полимерных композиционных материалов зависит от размеров частиц наполнителей, а также толщины слоя (δ) на границе раздела фаз.

По размеру частицы наполнителей для дисперсно-наполненных полимерных композиционных материалов можно разделить на:

– наночастицы с размером 1–100 нм;

– ультрадисперсные с размером 0.01–1.0 мкм;

– микрочастицы с размером 1.0–10 мкм;

– макрочастицы с размером 10–40 мкм;

– крупные частицы с размером более 50 мкм.

Для коротких волокон диаметр (d) варьируется в зависимости от природы и метода получения волокна (природные растительные, минеральные или искусственные и синтетические) в интервале от ~0.5 до 100 мкм, а длина (L) – от ~0.5 мкм до 15 мм. Критическая длина волокна определяется для конкретной полимерной матрицы и волокна ($L_{кр}$) экспериментально или рассчитывается по известным формулам [11].

Практическое создание дисперсно-наполненных полимерных композиционных материалов с разными типами дисперсной структуры представляет собой достаточно простую задачу по введению и распределению в полимерной матрице разного количества дисперсной фазы (наполнителя) – от минимального (φ_{min}) до максимально возможного (рис. 1).

Трансформация гетерогенной структуры с увеличением содержания дисперсной фазы от несвязанных в объеме частиц к бесконечному кластеру и далее к различным типам решеток с разной упаковкой дисперсных частиц, описаны в рамках теории построения решеток и модели Шкловского–Де Жена [8–10].

МАКСИМАЛЬНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИСПЕРСНОГО НАПОЛНИТЕЛЯ

Максимальное содержание дисперсного наполнителя (ДН) в дисперсно-наполненных полимерных композиционных материалах ограничено параметром φ_m (предельная критическая точка), причем при превышении данной концентрации в структуре материала появляются поры, и формируется трехфазная структура (полимер–наполнитель–газ).

Как показано в работе [9] для дисперсных наполнителей параметр φ_m можно определить по

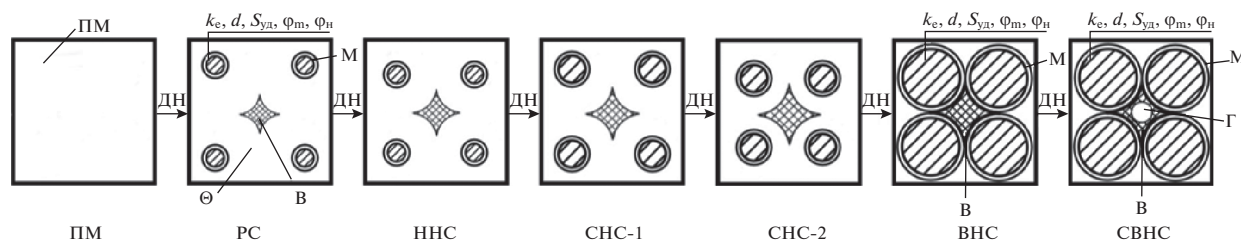


Рис. 1. Схема формирования разных типов структур дисперсно-наполненных полимерных композиционных материалов.

известным методикам, которые учитывают форму, размер, гранулометрический состав, упаковку и состояния поверхности дисперсных частиц.

Известно, что упаковка частиц зависит от их размера, так как с уменьшением диаметра происходит агломерация частиц, и образование пористых агломератов, а параметр φ_m снижается.

Ниже приведены усредненные значения параметра φ_m (об. д.) для твердых наполнителей с разными размерами частиц, которые хорошо согласуются с экспериментальными данными:

- наночастицы (НЧ) размером 1–100 нм – $\varphi_m \approx 0.05–0.20$ об. д.
- ультрадисперсные (УДЧ) размером 0.1–1.0 мкм – $\varphi_m \approx 0.20–0.255$ об. д.
- микрочастицы (МикЧ) размером 1.0–10 мкм – $\varphi_m \approx 0.255–0.45$ об. д.
- макрочастицы (МакЧ) размером 10–40 мкм – $\varphi_m \approx 0.45–0.62$ об. д.
- крупные частицы (КрЧ) размером более 50 мкм – $\varphi_m \approx 0.62–0.64$ об. д.

Как видно из представленных данных максимальное содержание дисперсного наполнителя в дисперсно-наполненных полимерных композиционных материалах достигается только для крупных и макрочастиц (до ~ 0.64 об. д.), которое снижается при введении наночастиц до ~ 0.05 об. д.

В работах [6–10] показано, что параметр φ_m зависит от природы, формы и деформируемости частиц под давлением:

- шарообразные твердые крупные частицы $\varphi_m \approx 0.60–0.64$ об. д.
- короткие жесткие волокна (до 15 мм) – $\varphi_m \approx 0.15–0.35$ об. д.
- газообразные частицы – $\varphi_m \approx 0.80–0.98$ об. д.
- пластичные частицы (деформируются под давлением) – $\varphi_m \approx 0.80–0.94$ об. д.

Для увеличения содержания дисперсного наполнителя в дисперсно-наполненных полимерных композиционных материалах на практике применяют, так называемые, плотные составы, построенные по принципу прерывистой (или непрерывной) гранулометрии. Ниже приведены значения параметра φ_m (об. д.) для плотных составов наполнителей:

- 2-х фракционные – $\varphi_m \approx 0.868$ об. д.
- 3-х фракционные – $\varphi_m \approx 0.928$ об. д.
- 4-х фракционные – $\varphi_m \approx 0.938$ об. д.

Использование плотных составов приводит к увеличению содержания наполнителя на $\sim 20–30$ об. % по сравнению с наполнителями, состоящими из крупных частиц ($\varphi_m \approx 0.62–0.64$ об. д.).

Как видно из приведенных данных размер, форма, гранулометрический состав (кривая распределения частиц по размерам) и деформируемость частиц (наполнителя), определяют упаковку дисперсных наполнителей в дисперсно-наполненных полимерных композиционных материалах и параметр φ_m .

Таким образом, максимальное содержание наполнителя (параметр φ_m) в дисперсно-наполненных полимерных композиционных материалах необходимо экспериментально определять для каждого реального наполнителя и на его основе прогнозировать создание составов с разным типом дисперсной структуры.

ОБОБЩЕННАЯ МОДЕЛЬ ДНПКМ

Нами предложено [8] модель гетерогенной гетерофазной структуры дисперсно-наполненных полимерных композиционных материалов рассматривать, как единую целую, монолитную систему, в которой гетерогенность описывается в рамках теории Пригожина–Де Жена, а полимерная матрица (φ_n) представлена в виде трех составляющих (Θ , B и M), которые выполняют различную функциональную роль при формировании структуры:

$$\varphi_n = (\Theta + B + M), \quad (1)$$

где Θ – доля полимерной фазы-матрицы (связующее) для образования прослойки между частицами наполнителя; B – доля полимерной фазы-матрицы (связующее) для заполнения объема между частицами с прослойками; M – доля полимерной фазы-матрицы (связующее) в граничных слоях с толщиной (δ).

Параметры дисперсной структуры Θ , B и M являются обобщенными, для расчета которых используется несколько основных параметров (φ_m ,

φ_n, d, δ), учитывающие формирование гетерогенности в дисперсно-наполненных полимерных композиционных материалах, т.е. форму, размер, упаковку и содержание дисперсного наполнителя.

Обобщенный параметр структуры Θ непосредственно связан с образованием полимерной прослойки между частицами в объеме системы, который придает системе подвижность и его можно рассчитать по формуле:

$$\Theta = (\varphi_m - f^3 \varphi_n) / \varphi_m, \quad (2)$$

где $f^3 = (1 + 2\delta/d)$, коэффициент, учитывающий отношение толщины граничного слоя (δ , мкм) к диаметру (d) дисперсной частицы.

Для заполнения объема между дисперсными частицами с прослойками в дисперсно-наполненных полимерных композиционных материалах необходима доля полимерной матрицы (связующего) B , которую можно определить как:

$$B = \left(\frac{1 - \varphi_m}{\varphi_m} \right) f^3 \varphi_n. \quad (3)$$

Обобщенный параметр (M) структуры дисперсно-наполненных полимерных композиционных материалов, учитывающий формирование граничного слоя можно рассчитать по формуле:

$$M = (f^3 - 1) \varphi_n. \quad (4)$$

Геометрический параметр δ является результатом физико-химического взаимодействия двух фаз, приведенных в молекулярный контакт с образованием межфазного слоя (M), размеры которого могут изменяться для полимерных систем в пределах от ~ 0.01 до 0.5 мкм.

При максимальном содержании дисперсного наполнителя (φ_m) в наполненной системе содержание полимерной матрицы (связующего) будет равно $\varphi_n = B + M$, так как при $\varphi_n \approx \varphi_m$ значение параметра $\Theta \rightarrow 0$ и обобщенный параметр B придает монолитность всей гетерогенной системе.

Основным параметром дисперсной фазы для построения гетерогенной структуры дисперсно-наполненных полимерных композиционных материалов является параметр φ_m – максимальное содержание дисперсной фазы в композите, который позволяет осуществить переход к обобщенным параметрам дисперсной структуры $\rightarrow \Theta, B$ и M .

Новый подход к вопросам структурообразования дисперсно-наполненных полимерных композиционных материалов заключается в совместном рассмотрении основных положений теории решеток, упаковок, перколяции гетерогенных систем и модельных представлений о монолитной гетерофазной структуре, которая описывается в терминах обобщенных параметров, а полимерная матрица представлена в виде трех функциональных составляющих ($\varphi_n = \Theta + B + M$), что позволяет провести классификацию всех дисперсно-на-

полненных систем по структурному принципу и найти количественные соотношения.

КЛАССИФИКАЦИЯ ДНПКМ ПО СТРУКТУРНОМУ ПРИНЦИПУ

При создании классификации дисперсно-наполненных полимерных композиционных материалов удалось связать основные типы и параметры решеток (координационное число Z – число касаний сфер в объеме и плотность упаковки – $k_{уп}$) с обобщенным параметром Θ и типами дисперсной структуры (табл. 1).

В представленной классификации по структурному принципу основные типы решеток (ГР – гипотетическая решетка, БК – бесконечный кластер, ТР – тетраэдрическая и КР – кубическая решетка) связаны с построением ДНПКМ с разными типами дисперсных структур (РС – разбавленные, ННС – низко – наполненные, СНС – средне-наполненные – СНС-1 – до предела текучести и СНС-2 – с пределом текучести, ВНС – высоконаполненные и СВНС сверх высоконаполненные системы):

$$\begin{aligned} \text{ГР} &\rightarrow \text{РС}; \text{БК} \rightarrow \text{ННС}, \\ \text{ТР} &\rightarrow \text{СНС и КР} \rightarrow \text{ВНС}. \end{aligned}$$

В работах [9] для более полного описания гетерогенной гетерофазной структуры дисперсно-наполненных полимерных композиционных материалов дополнительно были введены приведенные параметры – Θ/B и Θ/S_n .

Новые приведенные обобщенные параметры структуры дисперсно-наполненных полимерных композиционных материалов (Θ/B и Θ/S_n) связаны с соотношениями параметров при увеличении содержания дисперсной фазы с известными характеристиками. Так до определенного содержания наполнителя в структуре дисперсно-наполненных полимерных композиционных материалов превалирует доля полимерной матрицы, заключенная в прослойках (Θ), а затем возрастает роль объема полимерной матрицы B , что сказывается на комплексе технологических и эксплуатационных свойств.

Приведенный параметр Θ/S_n отражает не только построение полимерной матрицы в дисперсной структуре, а также учитывает протяженность поверхности твердой фазы в дисперсно-наполненных полимерных композиционных материалах для наполнителя с известной удельной поверхностью $S_{уд}$ и диаметром частиц d .

По приведенным параметрам Θ/B и Θ/S_n также, как и по Θ , можно провести классификацию дисперсно-наполненных полимерных композиционных материалов по структурному принципу с указанием типа дисперсной структуры [9].

Таким образом, предложены обобщенные и приведенные параметры структуры дисперсно-

Таблица 1. Тип и параметры решеток, обобщенный параметр структуры дисперсно-наполненных полимерных композиционных материалов и их классификация по структурному принципу

п/п	Тип решетки	Координационное число, Z (число касаний сфер)	Плотность упаковки, $k_{уп}$	Обобщенный параметр Θ , об. д.	Тип дисперсной структуры
1	Гипотетическая	<1	<0.076	<0.90	РС
2	Бесконечный кластер	1	0.076	0.90	ННС
		2	0.16	0.75	ННС
3	Тетраэдрическая	3	0.255	0.60	СНС-1
		4	0.34	0.45	СНС-1
		5	0.43	0.30	СНС-2
4	Кубическая				
4.1	простая (хаотическая)	6	0.52	0.20	ВНС
		7	0.6	0.015	ВНС
4.2	гранецентрированная	7	0.637	0.0	ВНС
4.3	объемно-центрированная	8	0.68	0.0	ВНС
5	Кубическая плотная	—	—	$\varphi_n > \varphi_m$	СВНС

Таблица 2. Тип структуры и содержание наполнителя (φ_n , об. д.) в дисперсно-наполненных полимерных композиционных материалах для частиц разного размера при значениях параметра φ_m от 0.1 до 0.85 об. д.

Тип дисперсной структуры	Обобщенный параметр Θ , об. д.	Содержание наполнителя (φ_n , об. д.) для частиц разных размеров и значений параметра φ_m , об. д.							
		НЧ	УДЧ	МикЧ		МакЧ		КрЧ	
		0.1	0.25	0.35	0.40	0.45	0.60	0.64	0.85
РС	0.99–0.90	0.001–0.01	0.001–0.03	0.001–0.04	0.001–0.04	0.001–0.04	0.001–0.06	0.001–0.06	0.001–0.09
ННС	0.90–0.75	0.01–0.03	0.03–0.06	0.04–0.09	0.04–0.10	0.05–0.13	0.06–0.15	0.06–0.16	0.09–0.21
СНС-1	0.75–0.45	0.03–0.06	0.06–0.14	0.09–0.19	0.10–0.22	0.13–0.25	0.15–0.33	0.16–0.35	0.21–0.47
СНС-2	0.45–0.20	0.06–0.08	0.14–0.20	0.19–0.28	0.22–0.32	0.25–0.37	0.33–0.48	0.35–0.51	0.47–0.68
ВНС	0.20–0.0	0.08–0.1	0.20–0.25	0.28–0.35	0.32–0.40	0.37–0.45	0.48–0.60	0.51–0.64	0.68–0.85

наполненных полимерных композиционных материалов, которые на количественном уровне позволяют четко провести классификацию дисперсных систем и определить их тип структуры для конкретного наполнителя и полимерной матрицы (РС; ННС, СНС-1, СНС-2, ВНС и СВНС).

Впервые нами предлагается проектировать (конструировать) составы дисперсно-наполненных полимерных композиционных материалов с заданным типом дисперсной структуры с учетом параметров решеток (Z , $k_{уп}$), обобщенных (Θ , B и M) и приведенных параметров (Θ/B и Θ/S_n).

От заданного типа структуры дисперсно-наполненных полимерных композиционных мате-

риалов и ее обобщенных и приведенных параметров следует переходить к определению содержания наполнителя с известным параметром φ_m , которое обеспечивает данную структуру.

Содержание дисперсного наполнителя в дисперсно-наполненных полимерных композиционных материалах с заданным типом дисперсной структуры при известном значении φ_m и заданным параметром Θ (согласно классификации) можно рассчитать по формуле:

$$\varphi_n = \varphi_m (1 - \Theta) \text{ об. д.} \quad (5)$$

Задавая разные значения обобщенного (Θ) или приведенных (Θ/B и Θ/S_n) параметров, ис-

следователь прогнозирует тип структуры дисперсно-наполненных полимерных композиционных материалов с используемым дисперсным наполнителем с известным параметром Φ_m для любой полимерной матрицы.

В табл. 2 приведены расчетные значения содержания (Φ_n , об. д.) дисперсных наполнителей с разными размерами частиц и параметром Φ_m для ДНПКМ с различными типами дисперсной структуры (РС, ННС, СНС-1, СНС-2 и ВНС).

Таким образом, удается показать влияние уровня гетерогенности, упаковки, формы и содержания дисперсной фазы в полимерной матрице, а также функционального построения дисперсионной среды (полимерная матрица) на тип и параметры дисперсной структуры дисперсно-наполненных полимерных композиционных материалов и нанокомпозитов. Предложенные теоретические положения можно распространить на построение дисперсных структур композиционных материалов на основе металлических и керамических матриц.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Тип дисперсной структуры, ее обобщенные и приведенные параметры определяют комплекс технологических и эксплуатационных свойств, что убедительно было показано в работах по исследованию реологических [12], электрофизических и физико-механических свойств дисперсно-наполненных полимерных композиционных материалов [4, 9].

Дисперсно-наполненные полимерные композиционные материалы можно успешно переработать методами литья под давлением и экструзии со структурой РС, ННС, СНС-1 (до предела текучести) в изделия сложной конфигурации и разных типоразмера (до $\Theta > 0.45$ об. д.).

Минимальные значения удельного электрического сопротивления (ρ_v) у дисперсно-наполненных полимерных композиционных материалов получают при типе структуры СНС-2 и ВНС и $\Theta \approx 0.10-0.20$ об. д.

Максимальные значения физико-механических характеристик (прочность) ДНПКМ по данным многочисленных работ достигаются при создании типа дисперсной структуры СНС-1 (до предела текучести) и обобщенным параметром $\Theta \approx 0.5-0.6$ об. д. [8].

Показано, что зависимости технологических и эксплуатационных свойств дисперсных систем следует представлять только в координатах свойство – обобщенный (Θ) или приведенный параметр (Θ/V или Θ/S_n), которые отражают тип (РС, ННС, СНС-1, СНС-2 и ВНС) гетерогенной гетерофазной структуры дисперсно-наполненных полимерных композиционных материалов и позволяют проводить сравнение экспериментальных зависимостей состав – свойство для дисперсных

систем с любыми наполнителями и полимерными матрицами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Раскутин А.Е.* Стратегия развития полимерных композиционных материалов //Авиационные материалы и технологии. 2017. № 5.
2. Колосова А.С. и др. Современные полимерные композиционные материалы и их применение // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2018. № 5-1. С. 245–256.
3. *Люкшин Б.А.* и др. Дисперсно-наполненные полимерные композиты технического и медицинского назначения. 2017.
4. *Kolosova A.S. et al.* Modern polymer composite materials and their application // International J. Applied and Basic Research. 2018. Т. 1. С. 245–256.
5. *Адашкин А.М., Красновский А.Н., Тарасова Т.В.* Материаловедение и технология металлических, неметаллических и композиционных материалов. 2021.
6. *Симонов-Емельянов И.Д., Пыхтин А.А.* “Кривая уплотнения порошкообразных наполнителей и расчет составов дисперсно-наполненных полимерных композитов с разной структурой и свойствами” // Материаловедение 2020. № 6. С. 37–44.
7. *Фам К.З.* Реологические свойства расплавов дисперснонаполненных композиционных материалов на основе полиэтилена, содержащего стеклянные микрошарики / К.З. Фам, П.В. Суриков // Полимеры в стратегии научно-технического развития РФ “Полимеры-2020”: Сборник тезисов Восьмой Всероссийской Каргинской конференции, Москва, 09–13 ноября 2020 года. Москва: Общество с ограниченной ответственностью “МЕ-СОЛ”, 2020. С. 174.
8. *Simonov-Emel'yanov I.D.* The Structure and Calculation of Compositions of Disperse-Filled Polymer Adhesives and Sealants in Mass and Volume Units // Polymer Science, Series D. 2020. Т. 13. № 2. С. 169–171. Polymer Science – Series D V.13. Is. 3. 1 July 2020, P. 265–269.
9. *Simonov-Emelyanov I.D., Kharlamova K.I.* Filler Particle Size and Packaging and Compositions of Filled Polymer Composites with Different Types of Structures and Properties // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. 2020. –Т. 54. № 6. С. 1290–1296.
10. *Нгуен Ч.Н., Саньярова М.В., Симонов-Емельянов И.Д.* Расчет составов дисперсных наполненных полимерных композиционных материалов с разной структурой // Тонкие химические технологии. 2020. Т. 15. № 1. – С. 62–66.
11. *Шульга А.В.* Композиты. Ч.1. Основы материаловедения композитных материалов. М.: НИЯУ МИФИ, 2013. 96 с.
12. *Krechetov D.D., Simonov-Emelianov I.D.* Structure, Generalized Parameters, and Rheological Properties of Dispersion-Filled Thermoplastics // Inorganic Materials: Applied Research. 2021. Т. 12. № 4. С. 889–896.