

УДК 678.021

РАЗМЕР ЧАСТИЦ НАПОЛНИТЕЛЯ, УПАКОВКА И СОСТАВЫ НАПОЛНЕННЫХ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ С РАЗНЫМ ТИПОМ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВАМИ

© 2020 г. И. Д. Симонов-Емельянов^а, К. И. Харламова^{а, *}

^аМИРЭА – Российский технологический университет (Институт тонких химических технологий им. М.В. Ломоносова), Москва, Россия

*e-mail: kseenka.kh@gmail.com

Поступила в редакцию 27.04.2020 г.

После доработки 18.05.2020 г.

Принята к публикации 18.06.2020 г.

Рассматриваются вопросы влияния размера частиц твердых наполнителей на плотность упаковки и максимальную долю наполнителя (ϕ_m) в дисперсно-наполненных полимерных композиционных материалах. Приводится зависимость параметра ϕ_m от диаметра твердых частиц наполнителей. Показано, что для крупных частиц (более 50 мкм) ϕ_m в дисперсно-наполненных полимерных композиционных материалах может достигать ~0.64 об. д., а для наночастиц (1–100 нм) не более ~0.255 об. д. Для деформирующихся под давлением и газообразных частиц, а также для плотных составов наполнителей значение параметра ϕ_m в дисперсно-наполненных полимерных композиционных материалах может достигать ~0.90–0.94 об. д. Установлена связь размеров частиц с их упаковкой и обобщенным параметром дисперсной структуры Θ , что позволяет провести классификацию рассматриваемого типа материалов разным размером частиц по структурному принципу и установить их тип структурной организации (разбавленные, низконаполненные, средненаполненные, высоконаполненные и сверхвысоконаполненные системы), который определяет свойства композитов. Предложен алгоритм расчета содержания наполнителя и составов дисперсно-наполненных полимерных композиционных материалов с разными размерами частиц, природой и деформируемостью частиц для проектирования различных типов структур композитов, технологических и эксплуатационных свойств.

Ключевые слова: наполнители, полимеры, полимерные композиционные материалы, составы и свойства

DOI: 10.31857/S0040357120060214

ВВЕДЕНИЕ

При создании дисперсно-наполненных полимерных композиционных материалов (ДНПКМ) с требуемым комплексом свойств широко используются дисперсные наполнители.

В качестве наполнителей для создания ДНПКМ можно применять практически все материалы, имеющиеся на земле, после придания им заданной формы, размера и структуры (металлы, керамики, полимеры, жидкости, газы и т.д.).

Порошкообразные дисперсные наполнители для ДНПКМ характеризуются разной природой, формой, размером, удельной поверхностью и пористостью частиц, а также комплексом физико-химических, механических, электрофизических и других специальных характеристик [1].

Введение дисперсных частиц в полимерные матрицы позволяют получать полимерные композиты с разнообразными свойствами.

Полимерный композиционный материал (ПКМ) – это многокомпонентный гетерогенный гетерофазный монолитный материал, состоящий из двух и более компонентов (фаз), с непрерывной в объеме полимерной матрицей, имеющий границу раздела фаз, а также новую структуру и комплекс технологических и эксплуатационных свойств.

Природа исходных компонентов, состав, дисперсная структура и ее параметры определяют технологические и эксплуатационные свойства ДНПКМ.

В работе [2] приведена новая модель дисперсной структуры полимерных композитов, ее описание в терминах обобщенных параметров и показана связь с теорией построения решеток.

Классификация всех ДНПКМ по типам структур [разбавленные (РС), низконаполненные (ННС), средненаполненные (СНС; СНС-1 – до предела текучести, СНС-2 с пределом текучести),

высоконаполненные (ВНС) и сверхвысоконаполненные системы (СВНС)] проведена по обобщенному параметру Θ , который учитывает упаковку, форму, размеры, содержание дисперсной фазы и функциональное построение полимерной матрицы (связующего) в ДНПКМ. Обобщенный параметр Θ определяет долю полимерной матрицы (связующего) для организации непрерывной прослойки между дисперсными частицами наполнителя в ДНПКМ.

Структурная организация ДНПКМ характеризуется присущим только ей комплексом технологических и эксплуатационных свойств.

В статье приводятся данные о размерах дисперсных частиц, их параметрах, упаковках, построении ДНПКМ разных типов структур, составов и их свойствах.

ЗАВИСИМОСТЬ ПАРАМЕТРА ϕ_m ДЛЯ ДИСПЕРСНЫХ НАПОЛНИТЕЛЕЙ С РАЗНЫМИ РАЗМЕРАМИ ЧАСТИЦ

Гетерогенность композиционных материалов определяется размерами включений и частиц наполнителей, а также размерами границы раздела фаз. По размеру частиц наполнителя для ДНПКМ можно разделить на следующие: наночастицы (НЧ) размером 1–100 нм, ультрадисперсные частицы (УДЧ) размером 0.1–1.0 мкм, микрочастицы (МикЧ) размером 1.0–10 мкм, макрочастицы (МакЧ) размером 10–40 мкм и крупные частицы (КрЧ) размером более 50 мкм.

Упаковка дисперсных шарообразных частиц, согласно теории, не зависит от их размера и при кубической упаковке максимальное содержание наполнителя в композите должно составлять 0.64 об. д. Однако структура наполнителя, его поверхности, форма и размер частиц существенно влияют на параметры их упаковки – плотность упаковки (k_p).

Уменьшение размера частиц от крупных до наночастиц реально сопровождается снижением плотности упаковки и максимальной доли дисперсного наполнителя в ДНПКМ с 0.64 до 0.05 об. д. Избыточная поверхностная энергия приводит к агломерации частиц малых размеров (менее ~10 мкм) с образованием рыхлых агломератов больших диаметров.

Для реальных наполнителей следует определять экспериментально их плотность упаковки k_p и максимальную долю наполнителя ϕ_m в ДНПКМ, что необходимо при проектировании составов дисперсно-наполненных систем с заданным типом структуры. Собственно, от максимального содержания дисперсного наполнителя ϕ_m , можно рассчитать все возможные составы монолитных ДНПКМ с данным дисперсным наполнителем

при условии $\phi_n \leq \phi_m$, т.е. содержание наполнителя в материале меняется от ϕ_{\min} до ϕ_m .

Так, для крупных, любой формы частиц наполнителя с диаметром более 40–50 мкм параметр ϕ_m можно рассчитать по значениям истинной и насыпной плотности (по ГОСТ), так как такие наполнителя практически не слипаются и не образуют агломератов:

$$\phi_m = \rho_{\text{pour}} / \rho_{\text{true}},$$

где ρ_{true} и ρ_{pour} – истинная и насыпная плотность частиц наполнителя.

При уменьшении размера частиц дисперсной фазы менее ~10 мкм их избыточная энергия поверхности возрастает, и частицы слипаются, образуя новые структуры из агломератов. В этом случае методика определения параметров k_p и ϕ_m по насыпной плотности некорректна.

Как показано в работе [3], для таких частиц используется методика с построением кривой уплотнения порошкообразных наполнителей разной природы, гранулометрического состава, формы, размера и состояния поверхности дисперсных частиц под давлением.

При создании реальных полимерных композитов для выбранных исходных компонентов – полимерная матрица (связующее) и дисперсный наполнитель, можно использовать методику по определению параметра ϕ_m по трем концентрациям (по пористости) или по поглощению жидкого масла или пластификатора наполнителем (ГОСТ) [3].

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

– наночастицы размером 1–100 нм $\phi_m \approx 0.05$ –0.20 об. д.

– ультрадисперсные размером 0.1–1.0 мкм $\phi_m \approx 0.20$ –0.255 об. д.

– микрочастицы размером 1.0–10 мкм $\phi_m \approx 0.255$ –0.45 об. д.

– макрочастицы размером 10–40 мкм $\phi_m \approx 0.45$ –0.62 об. д.

– крупные частицы размером более 50 мкм $\phi_m \approx 0.62$ –0.64 об. д.

На рис. 1 представлена экспериментальная зависимость усредненных значений параметра ϕ_m для порошкообразных наполнителей от размера частиц. Приведены данные по значению параметра ϕ_m для крупных, макро- и микрочастиц, а также для ультрадисперсных и наночастиц.

Таким образом, плотность упаковки частиц k_p и максимальное содержание наполнителя ϕ_m в ДНПКМ зависят от размера частиц, что необхо-

димо учитывать при создании ДНПКМ с заданным типом дисперсной структуры.

Экспериментальная зависимость $\varphi_m = f(d)$ хорошо аппроксимируется выражением

$$\varphi_m = 0.64 - 0.5 \exp(-0.1d). \quad (1)$$

При проектировании составов ДНПКМ следует учитывать, что максимальное содержание наполнителя в полимерном двухфазном композите не может превышать значение параметра φ_m в объемных долях (процентах). При условии, что $\varphi_f > \varphi_m$, в композиционном полимерном материале образуются поры, которые существенно снижают физико-механические характеристики, а материал нельзя называть монолитным.

Максимальное содержание наполнителя для наночастиц не может быть больше ~ 0.255 об. д., а для крупных частиц ~ 0.64 об. д.

Зависимость, представленная на рис. 1, является границей раздела при построении составов ДНПКМ с максимальной объемной долей наполнителя: под кривой – содержание наполнителя (φ_f), а над кривой – содержание полимерной матрицы (связующего), которое находят как $\varphi_{pol} = 1 - \varphi_f$.

Таким образом, если в полимер необходимо ввести большое количество твердого жесткого наполнителя, то следует выбирать наполнитель с крупными частицами.

Как показано в работах [1, 2, 4, 5], 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 параметра φ_m и содержания наполнителей в ДНПКМ проектируют специальные плотные составы, регулируя гранулометрический состав наполнителей. Плотные составы наполнителей, сконструированные по прерывистой гранулометрии, состоят из нескольких узких фракций, как правило, из 2–3 фракций наполнителя (наполнителей) с разными диаметрами частиц. Можно проектировать плотные составы наполнителей с непрерывной гранулометрией, используя специальную методику расчета [1].

Ниже приведены значения параметра φ_m (об. д.) для плотных составов наполнителей, построенных по принципу прерывистой гранулометрии:

- двухфракционные $\varphi_m \approx 0.868$ об. д.
- трехфракционные $\varphi_m \approx 0.928$ об. д.
- четырехфракционные $\varphi_m \approx 0.938$ об. д.

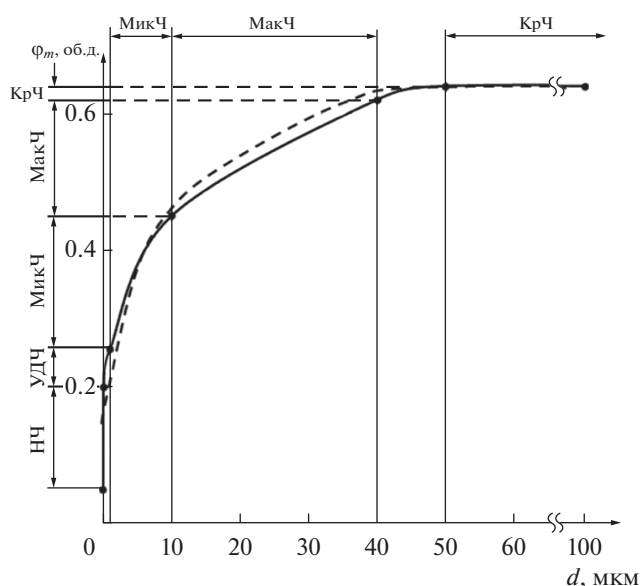


Рис. 1. Зависимость параметра φ_m для дисперсных наполнителей от диаметра твердых частиц. Пунктир – кривая, аппроксимированная выражением (1).

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.).

Таким образом, размер и форма частиц, гранулометрический состав (кривая распределения частиц по размерам) и деформируемость определяют упаковку дисперсных наполнителей и параметр φ_m .

Ключевой характеристикой для создания ДНПКМ является параметр φ_m , который определяет верхнюю границу составов и всю номенклатуру полимерных материалов с данным наполнителем. В этом случае можно проектировать составы ДНПКМ с содержанием наполнителя φ_f от φ_{min} до φ_m .

Ниже представлены данные по составам и типам структур ДНПКМ с разными размерами частиц наполнителя и параметром φ_m .

ДНПКМ с крупными частицами. На рис. 2 приведена зависимость содержания дисперсного наполнителя с крупными частицами от обобщенного параметра Θ с указанием типа структуры ДНПКМ. По приведенной линейной зависимости $\varphi_f = f(\Theta)$ для крупных частиц с $\varphi_m \approx 0.64$ об. д. проектируют составы ДНПКМ с разными типами дисперсной структуры (РС, ННС, СНС (СНС-1 и СНС-2), ВНС), в которых φ_f изменяется в пределах от φ_{min} (РС) до $\varphi_m \approx 0.64$ об. д. (ВНС).

Задавая разное содержание наполнителя и рассчитывая обобщенный параметр Θ по известной формуле [2], можно проектировать разный

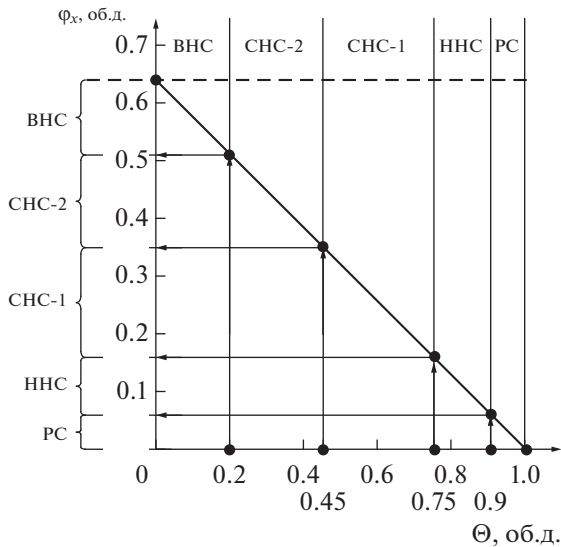


Рис. 2. Зависимость содержания наполнителя ϕ_f в ДНПКМ с разными типами структур от обобщенного параметра Θ для крупных частиц с параметром $\phi_m = 0.64$ об. д.

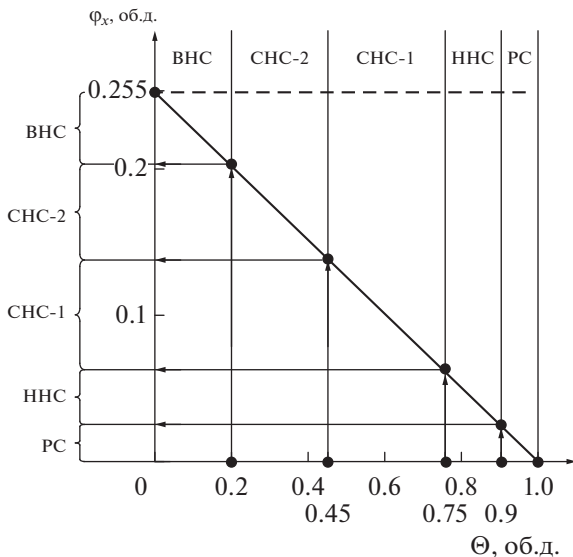


Рис. 3. Зависимость содержания нанонаполнителя ϕ_f в ДНПКМ с разными типами структур от обобщенного параметра Θ для наночастиц с параметром $\phi_m = 0.255$ об. д.

тип структуры ДНПКМ и регулировать их свойства, или наоборот, при этом в области ВНС содержание наполнителя достигает ~ 0.50 – 0.64 об. д.

ДНПКМ с наночастицами. Для наночастиц с диаметром от 1 до 100 нм, которые образуют рыхлые агломераты достаточно сложной структуры, параметр ϕ_m , как правило, не превышает ~ 0.20 – 0.255 об. д. При расчете обобщенного параметра Θ

для нанокомпозитов возникает проблема в определении доли полимера в граничном слое (M). Необходимо знать размеры (толщину) граничного слоя в конкретной системе и учитывать ее при расчетах.

На рис. 3 приведена зависимость $\phi_f = f(\Theta)$ для нанокомпозитов. Как видно из представленных данных, для построения дисперсных наносистем с разными типами структур (РС, ННС, СНС (СНС-1 и СНС-2) и ВНС) практически требуется в ~ 2.5 раза меньше наполнителя по объему (об. д.), чем для крупных частиц.

Так, для нанонаполнителей с высокой удельной поверхностью (более $100 \text{ м}^2/\text{г}$) значение параметра ϕ_m , как правило, не превышает ~ 0.10 об. д. и тогда содержание наполнителей для построения, например, структуры СНС-1 не превышает 0.02 – 0.03 об. д.

В связи с этим вывод об эффективности малых количеств нанонаполнителей в полимерных нанокомпозитах не является принципиальным, а указывает на общность построения разных типов структур в дисперсных системах.

ДНПКМ с микро- и макрочастицами занимают промежуточное положение по содержанию ϕ_n между представленными зависимостями для крупных частиц и наночастиц.

ДНПКМ с деформируемыми частицами наполнителей. Особый интерес вызывает создание ДНПКМ с деформируемыми частицами наполнителей под давлением и плотными составами, у которых параметр ϕ_m в технологическом процессе получения и переработки под давлением может существенно меняться, возрастая до предельных значений ~ 0.90 – 0.94 об. д.

На рис. 4 представлена зависимость $\phi_f = f(\Theta)$ для дисперсных систем с параметром $\phi_m \rightarrow 0.90$ – 0.94 об. д.

Для таких ДНПКМ при построении структур разных типов (РС, ННС, СНС (СНС-1 и СНС-2) и ВНС) количество наполнителя возрастает в ~ 1.5 раза по сравнению с крупными частицами. Дисперсные системы с высоким содержанием наполнителей всегда представляют повышенный интерес для потребителей.

Следует учитывать, что монолитные ДНПКМ можно получить при минимальном содержании полимерной матрицы ~ 0.06 об. д., после чего теоретически достигается сплошность материала.

АЛГОРИТМ РАСЧЕТА СОСТАВОВ ДИСПЕРСНЫХ СИСТЕМ С РАЗНЫМ ТИПОМ СТРУКТУР

Алгоритм расчета составов ДНПКМ и нанокомпозитов с разным типом структур для напол-

нителй различной природы, размеров и формы частиц, включая наночастицы, представлен ниже.

1. Экспериментально по известным методикам для дисперсного наполнителя определяют основные параметры: средний размер частиц (d_{av}) или кривую распределения частиц по размерам, или удельную геометрическую поверхность (S_{geom}), насыпную (ρ_{pour}) и истинную (ρ_{true}) плотность, пористость (Π) и др.

2. Экспериментально по известным методикам для дисперсного наполнителя с известным средним размером частиц определяют параметр упаковки как $\varphi_m = \rho_{pour}/\rho_{true}$ или по кривой уплотнения, или по трем концентрациям (по пористости) [4].

3. Рассчитывают для ДНПКМ значение обобщенного параметра Θ при известном значении параметра φ_m , задавая разное содержание наполнителя, при условии $\varphi_f \leq \varphi_m$, по формуле

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

где Θ – доля полимерной матрицы для формирования прослойки между дисперсными частицами в ДНПКМ; φ_m – максимальное содержание дисперсного наполнителя; φ_f – содержание дисперсного наполнителя; $f^3 = (1 + 2\delta/d)$ – коэффициент, учитывающий отношение толщины граничного слоя (δ) к диаметру (d) дисперсных частиц.

При толщинах граничного слоя δ от 10 до 500 нм в ДНПКМ и для дисперсных частиц с диаметром более ~ 10 мкм для расчета обобщенного параметра Θ можно использовать упрощенную формулу

$$\Theta = (\varphi_m - \varphi_f) / \varphi_m. \quad (3)$$

4. По значениям обобщенного параметра Θ определяют тип дисперсной структуры ДНПКМ согласно классификации: РС, ННС, СНС (СНС-1, СНС-2) и ВНС.

5. Находят содержание наполнителя φ_f для данного типа структуры ДНПКМ и проектируемого состава из формул (2) или (3) в объемных долях (процентах).

6. Проектируют состав ДНПКМ с заданным типом структуры, обобщенными параметрами и свойствами. По рассчитанному значению содержания наполнителя (φ_f) определяют объемную долю полимерной матрицы (φ_{pol}) как $\varphi_{pol} = 1 - \varphi_f$; при условии монолитности композита – $\varphi_f + \varphi_{pol} = 1$.

7. Для расчета навесок при приготовлении композиций ДНПКМ с известным объемным содержанием наполнителя и полимерной матрицы проводят пересчет объемных единиц в массовые согласно формуле

$$\varphi_{mass.f.} = \varphi_{vol.f.} / [\varphi_{vol.f.} (1 - \rho_{pol}/\rho_f) + \rho_{pol}/\rho_f], \text{ мас.д.} \quad (4)$$

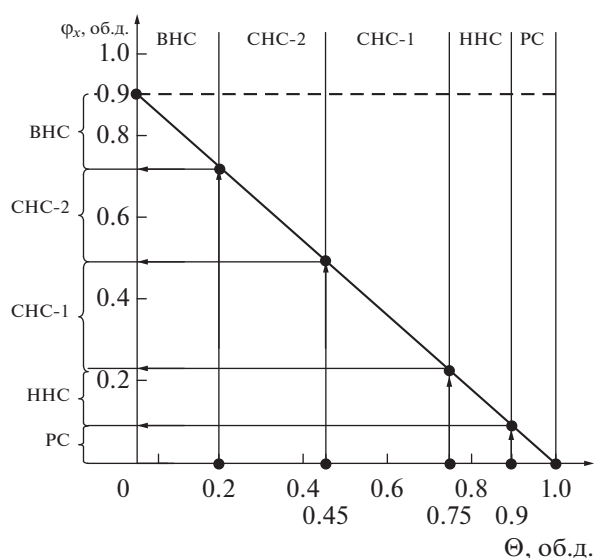


Рис. 4. Зависимость содержания деформирующегося под давлением наполнителя φ_f в ДНПКМ с разными типами структур от обобщенного параметра Θ ($\varphi_m = 0.90$ об. д.).

Можно решить и обратную задачу: при известном содержании дисперсного наполнителя в ДНПКМ (в объемных долях), его геометрических параметрах (d) и максимальной упаковке (φ_m) рассчитывают значение обобщенного параметра Θ и определяют тип дисперсной структуры композиционного материала (РС, ННС, СНС (СНС-1 и СНС-2) и ВНС). При этом содержание наполнителя в объемных долях (процентах) определяют по данным содержания наполнителя в массовых долях (процентах) в ДНПКМ по формуле

$$\varphi_{vol.f.} = (\rho_{pol}/\rho_f) / [(1/\varphi_{mass.f.}) + (\rho_{pol}/\rho_f) - 1], \text{ об.д.} \quad (5)$$

В табл. 1 приведены значения содержания дисперсного наполнителя с различными размерами (d) и упаковкой частиц (φ_m) для создания разных типов структур ДНПКМ.

Тип дисперсной структуры и ее параметры определяют поведение ДНПКМ как при переработке, так и эксплуатации, которые существенно зависят от размера и упаковки дисперсных частиц [2].

ВЛИЯНИЕ ОБОБЩЕННЫХ ПАРАМЕТРОВ И ТИПА СТРУКТУРЫ НА СВОЙСТВА ДНПКМ

Влияние типа структуры, обобщенного параметра Θ и содержания дисперсного наполнителя с известными размерами частиц на свойства ДНПКМ можно проследить на примере зависимости относительной вязкости от обобщенного параметра Θ (рис. 5). В качестве примера приве-

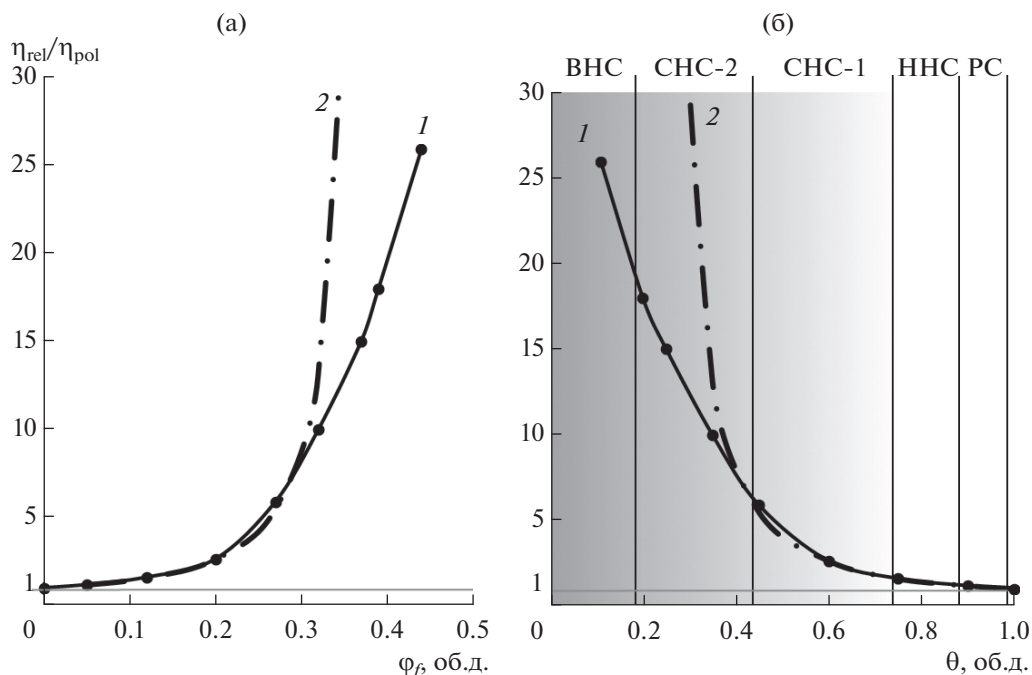


Рис. 5. Зависимость относительной вязкости при 220°С ДНПКМ на основе ПЭНП от объемной доли стеклянных шариков марки ШСО-30 (а) и от обобщенного параметра Θ (б): 1 – экспериментальная зависимость; 2 – расчет вязкости по уравнению Муни.

дены данные по вязкости для ДНПКМ на основе полиэтилена низкой плотности (ПЭНП) и стеклянных шариков марки ШСО-30 с диаметром частиц ~30 мкм и параметром $\phi_m \approx 0.50$ об. д.

С увеличением содержания твердой дисперсной фазы в полимерной матрице вязкость ДНПКМ возрастает. Зависимость относительной вязкости, представленная в традиционных координа-

тах $\eta_{rel} = f(\phi_f)$ (рис. 5а), не учитывает размер, форму, упаковку частиц и не позволяет судить о структуре ДНПКМ, так как содержание наполнителя (ϕ_f) не является структурным параметром дисперсной системы.

Зависимость вязкости от обобщенного параметра Θ структуры (рис. 5б) учитывает параметры дисперсной фазы (форму, размер, упаковку частиц),

Таблица 1. Тип структуры и содержание наполнителя в ДНПКМ для частиц разного размера при значениях параметра ϕ_m от 0.1 до 0.85 об. д.

Тип структуры ДНПКМ	Обобщенный параметр Θ , об. д.	Содержание наполнителя (ϕ_f , 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	0.50	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	0.001–0.05	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	0.13–0.28	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	0.28–0.40	0.33–0.48	0.35–0.51	0.47–0.68
ВНС	0.20–0.00	0.08–0.10	0.20–0.25	0.28–0.35	0.32–0.40	0.40–0.50	0.48–0.60	0.51–0.64	0.68–0.85

функциональное построение полимерной матрицы и тип дисперсной системы согласно классификации: РС, ННС, СНС (СНС-1 и СНС-2) и ВНС.

Видно, что изменение типа структуры приводит к возрастанию вязкости при переходе от разбавленных систем к низконаполненным, средне-наполненным и высоконаполненным системам. В области разбавленных и низконаполненных ДНПКМ вязкость увеличивается всего на ~20–50% от вязкости полимерной матрицы (ПЭНП).

При переходе к средненаполненным системам уже при $\Theta = 0.6$ об. д. (СНС-1) вязкость возрастает в 2.5 раза, а с появлением у систем предела текучести при $\Theta = 0.45$ об. д. (СНС-2) происходит резкий рост вязкости (в ~6 раз), которая возрастает в области высоконаполненных ДНПКМ в ~25 раз, что ухудшает переработку полимерных композиций в изделия.

В качестве примера на рис. 5 приведена расчетная зависимость вязкости по известному уравнению Муни (кривая 2), которая хорошо описывает реологическое поведение дисперсных систем только до $\Theta = 0.45$ об. д., т.е. до появления у ДНПКМ предела текучести (до СНС-2).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основным параметром для создания ДНПКМ с заданными типами дисперсной структуры является параметр φ_m – максимальное содержание наполнителя. В работе представлена зависимость параметра φ_m от размера частиц наполнителя и показано, что с уменьшением размера частиц происходит снижение максимальной доли наполнителя в ДНПКМ.

По обобщенному параметру Θ проведена классификация ДНПКМ по структурному принципу и рассчитано содержание наполнителей с разными размерами частиц и упаковкой для получения дисперсных структур заданного типа.

Показано, что, например, реологические свойства ДНПКМ определяются типом структуры и значением обобщенных параметров. Так, при переходе от разбавленных и низконаполненных дисперсных систем к средне- и высоконаполненным вязкость резко возрастает, что связано с формированием структур с более плотной упаковкой дисперсных частиц.

Установленные зависимости параметра φ_m от размера частиц и обобщенного параметра Θ от параметра φ_m позволяют рассчитывать содержание наполнителя и проектировать составы ДНПКМ с разными типами структур, согласно их классификации по структурному принципу (РС, ННС,

СНС (СНС-1 и СНС-2) и ВНС), а также комплексом технологических и эксплуатационных свойств.

ОБОЗНАЧЕНИЯ

d	диаметр дисперсных частиц
f^δ	коэффициент, учитывающий отношение толщины граничного слоя (δ) к диаметру (d) дисперсных частиц
k_p	плотность упаковки
S	площадь поверхности
δ	толщина граничного слоя
η	вязкость
Π	пористость
ρ	плотность
φ	доля дисперсной фазы

ИНДЕКСЫ

av	средний
f	наполнитель
geom	удельная геометрическая поверхность
m	максимальная доля
mass.f.	массовые доли наполнителя
min	минимальная доля
pol	полимерная матрица
pour, true	соответственно насыпная и истинная плотности
rel	относительный
vol.f.	объемные доли наполнителя

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Наполнители для полимерных композиционных материалов (справочное пособие) / Под ред. Каца Г.С., Милевски Д.В. М.: Химия, 1981.
2. *Симонов-Емельянов И.Д.* Параметры решетки и структуры дисперсно-наполненных полимерных композиционных материалов с регулируемым комплексом свойств // Констр. композ. матер. 2019. № 3. С. 37.
3. *Симонов-Емельянов И.Д., Шембель Н.Л., Прокопов Н.И., Ушакова О.Б., Гервальд А.Ю., Суриков П.В., Марков А.В., Пашкин И.И.* Методы технологических свойств наполнителей и полимерных материалов. М.: МИТХТ им. М.В. Ломоносова, 2014.
4. *Анциферов В.Н., Перельман В.Е.* Механика процессов прессования порошковых и композиционных материалов. М.: Грааль, 2001.
5. Прикладная механика ячеистых пластмасс / Под ред. Хильярда Н.К. М.: Мир, 1985.