

**Технологическая классификация дисперсных наполнителей  
по размерам и проектирование полимерных композитов с разными типами структур**  
**Technological classification of dispersed fillers  
by size and design of polymer composites with different types of structures**

*И.Д. СИМОНОВ-ЕМЕЛЬЯНОВ, К.И. ХАРЛАМОВА*

*I.D. SIMONOV-EMELYANOV, K.I. KHARLAMOVA*

ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (Институт тонких химических технологий  
имени М. В. Ломоносова), Москва, Россия

MIREA – Russian Technological University (Lomonosov Institute of Fine Chemical Technologies), Moscow, Russia

kharlamki@gmail.com

В работе приводятся данные по определению маслосъемности и олигомеросъемности дисперсных наполнителей на основе диоксида кремния с разными размерами частиц (от 50 нм до 250 мкм).

Показано, что по данным маслосъемности и олигомеросъемности можно провести полную технологическую классификацию дисперсных частиц по размерам и использовать ее для создания ДНПКМ с заданным составом, типом и параметрами структуры, а также комплексом эксплуатационных свойств.

Приведены значения максимального содержания дисперсного наполнителя (параметр  $\varphi_m$ ) в ДНПКМ для частиц разного размера (от 50 нм до 250 мкм), которые были получены по маслосъемности и олигомеросъемности, а также другими методами.

Впервые предлагается алгоритм проектирования составов ДНПКМ с разными типами структур по данным маслосъемности и олигомеросъемности дисперсных наполнителей с разными размерами и распределением частиц по размерам.

Методики просты, доступны и эффективны, что позволит решать задачи по созданию ДНПКМ с заданной структурой и комплексом требуемых свойств быстро, надежно и минимальными затратами.

Приведены составы ДНПКМ с разными размерами частиц наполнителей, типами структур, которые охватывают практически весь спектр современных полимерных композитов.

**Ключевые слова:** маслосъемность, олигомеросъемность, дисперсные наполнители, технологическая классификация частиц по размерам, упаковка дисперсных частиц, полимерные композиционные материалы

The paper presents data on the determination of oil capacity and oligomer capacity of dispersed fillers based on silica with different particle sizes (from 50 nm to 250 microns).

It is shown that using the oil absorption and oligomeric capacity data, it is possible to carry out a complete technological classification of dispersed particles by size and use it to create disperse filled polymer composite materials (DFPCM) with a given composition, type and structure parameters, as well as a set of operational properties.

The values of the maximum disperse filler content (parameter  $\varphi_m$ ) in DFPCM for particles of different sizes (from 50 nm to 250 microns) obtained by oil and oligomer adsorption and other methods are presented.

For the first time, an algorithm for designing DFPCM compositions with different types of structures based on oil and oligomer capacity data of disperse fillers with different particle sizes and particle size distributions is proposed.

The methods are simple, accessible and effective, which will allow solving problems of creating DFPCM with a given structure and a set of required properties quickly, reliably and with minimum costs.

Compositions of DFPCM with different particle sizes of fillers, types of structures that cover the practical whole spectrum of modern polymer composites are given.

**Keywords:** oil-adsorption, oligomer-adsorption, dispersed fillers, particle size classification, packing of dispersed particles, polymer composites

DOI: 10.35164/0554-2901-2022-9-10-3-6

Обобщенная модель и построение структуры дисперсно-наполненных полимерных композиционных материалов (ДНПКМ) и ее описание в обобщенных и приведенных параметрах позволяет существенно расширить границы применения и широко использовать результаты для анализа и создания инновационных материалов [1–3].

Разработанная нами обобщенная модель дисперсной структуры ДНПКМ [4] объединяет в единое целое построение гетерогенности в свободном пространстве (модель Пригожина – Де Жена) и представление пространства, занимаемое в монолитном материале полимерной матрицей, в виде трех функциональных элементов структуры.

В работе [5] впервые была предложена обобщенная модель структуры в обобщенных и приведенных параметрах и классифи-

кация ДНПКМ по структурному принципу: разбавленные (РС), низко-наполненные (ННС), средне-наполненные (СНС) и высоко-наполненные (ВНС).

Классификация позволяет на количественном уровне (по обобщенному параметру  $\Theta$ ) проектировать для конкретного наполнителя тип структуры и рассчитывать содержание дисперсной фазы ( $\varphi_n$ ) в ДНПКМ при известной максимальной упаковке ( $\varphi_m$ ) с учетом формы и размера частиц:

$$\varphi_n \approx (1 - \Theta) \varphi_m \quad (1)$$

где  $\Theta$  (об. д.) – доля полимерной матрицы для формирования прослоек между частицами в ДНПКМ.

Тип дисперсной структуры, ее обобщенные и приведенные параметры определяют комплекс физико-механических характеристик ДНПКМ [6].

Преимущество данной обобщенной модели ДНПКМ заключается в том, что в ней одновременно учитываются параметры гетерогенной дисперсной фазы (наполнителя) – форма ( $k_c$ ), размер ( $d$ ), упаковка частиц ( $k_{уп}$ ), их удельная поверхность ( $S_{уд}$ ) и поверхность раздела ( $S_n$ ) непосредственно в композите, а также распределение полимерной матрицы по объему в виде трех функциональных элементов (обобщенные параметры –  $\theta$ ,  $B$  и  $M$ ) [4].

Важными экспериментальными параметрами дисперсной фазы для построения монолитной структуры ДНПКМ в этом случае являются плотность упаковки ( $k_{уп}$ ) и максимальная доля дисперсного наполнителя (параметр  $\phi_m$ ) в композите [7].

Нами разработаны новые экспериментальные методики для определения параметра  $\phi_m$ , которые позволяют получать достоверные данные и надежно проектировать составы ДНПКМ с заданными типами дисперсной структуры и свойствами [8].

Разработанные методики по масло- и олигомероемкости просты в использовании, не требуют существенных затрат и дорогостоящего оборудования, доступны практически во всех условиях использования и позволяют с достаточной для инженерной практики точностью определять технологические параметры порошкообразных (дисперсных) наполнителей любой природы [9, 10].

В настоящей статье представлены экспериментальные данные по определению параметра  $\phi_m$  для дисперсных наполнителей разной природы, структуры, размера и т. д. с помощью новых методик по масло- и олигомероемкости, и технологическая классификация дисперсных частиц по размерам, которая была предложена на основании проведенных экспериментов.

Плотность упаковки крупных дисперсных частиц (с диаметром более ~50 мкм) практически не зависит от их размера (кубическая упаковка – 0,64 об.д. и гексагональная – 0,74 об.д.). При уменьшении размера частиц (менее ~10 мкм) плотность их упаковки снижается, что связано с повышением энергии поверхности частиц, слипанием, агломерацией и формированием рыхлых агломератов из частиц начальных размеров.

В научно-технической литературе и классических работах по коллоидной химии [11] предлагаются различные классификации дисперсных твердых частиц (наполнителей) по размерам. Так, например, в работе [12] В.К. Крыжановский предлагает следующую классификацию дисперсных частиц по размерам:

1. Тонкодисперсные – до 5 мкм;
2. Среднедисперсные до 50 мкм;
3. Крупнодисперсные – до 500 мкм;
4. Зернистые – более 500 мкм.

Для данной классификации частиц по размерам были использованы различные технологические характеристики, однако нами впервые предлагается определять их свойства, непосредственно связанные с созданием дисперсно-наполненных полимерных композиционных материалов с разным типом структуры и обобщенными параметрами, а, следовательно, и свойствами.

Классификация дисперсных частиц по размерам для создания ДНПКМ по плотности упаковки и параметру  $\phi_m$  в научно-технической литературе отсутствует.

В качестве дисперсной фазы были выбраны наполнители одной химической природы (диоксид кремния) с разным размером частиц от 50 нм до 250 мкм различных марок, охватывающие практически весь спектр наполнителей для ДНПКМ: МСП-250 (микрошарики стеклянные полнотелые, товарная фракция 200–300 мкм, ООО «ИНОТЭК АКВА», Россия), МСП-55 (микрошарики стеклянные полнотелые, товарная фракция 40–70 мкм, ООО «ИНОТЭК АКВА», Россия), кварц А (кварц молотый пылевидный марки А с  $d_{ср} \approx 25$  мкм, ООО «РГОК», Россия), кварц 20 (кварц молотый пылевидный марки 20, ГК «Минеральные наполнители», Россия), SIKRON SF300 (тонкомолотая кварцевая мука SIKRON марки SF800 с  $d_{ср} \approx 10$  мкм, ООО «Кварцверке Ульяновск»), SIKRON SF800 (тонкомолотая кварцевая мука SIKRON марки SF800 с  $d_{ср} \approx 2$  мкм, ООО «Кварцверке Ульяновск») и БС-50 (белая сажа марки БС-50 с  $d_{ср} \approx 45$  нм, ООО «БСК Содовая компания», Россия).

Частицы диоксида кремния всех марок характеризуются непористой структурой. Узкие фракции для крупных частиц (более 50 мкм) получали методом ситового отсева, а фракционный состав для фракций с мелкими частицами исследовали с помощью

лазерного анализатора размера частиц LS 13320 (Beckman Coulter, Inc., США).

Размеры частиц наполнителя были выбраны целенаправленно: крупные, макро-, микро- и наночастицы, охватывающие практически весь диапазон дисперсных наполнителей, используемых для создания ДНПКМ [6].

Учитывая многообразие форм, размеров, состояния поверхности частиц и т.д., параметр  $\phi_m$  для реальных дисперсных наполнителей определяют экспериментально по известным методикам: по насыпной плотности, кривой уплотнения, маслосоемкости, олигомероемкости и пористости ДНПКМ (метод трех концентраций) [4].

Для частиц наполнителя разной формы с размером частиц более ~50 мкм параметр  $\phi_m$  достаточно просто определить по данным насыпной ( $\rho_{нас}$ ) и истинной ( $\rho_{ист}$ ) плотности с использованием ГОСТ 11035.1-93:

$$\phi_m = \rho_{нас} / \rho_{ист} \quad (2)$$

Значение параметра  $\phi_m$  для различных наполнителей также можно оценить по кривой их уплотнения под давлением в области разрушения арочных структур и агломератов [9].

Для дисперсных наполнителей с разными размерами ( $d_{ср}$ ) частиц по кривой их уплотнения под давлением определили параметр  $\phi_m$ . С уменьшением размера частиц максимальное содержание наполнителя в ДНПКМ снижается, однако для крупных частиц с диаметром 50–250 мкм и более остается постоянным и приближается к кубической упаковке для шаров (~0,60–0,64 об.д.).

В работах [9–10] с использованием ГОСТ 21119.8–75 нами были предложены новые методики определения максимального содержания дисперсного наполнителя  $\phi_m$  по маслосоемкости и олигомероемкости. В качестве критерия было рекомендовано использовать минимальный объем жидкости (льняное масло или эпоксидный олигомер марки DER-330), необходимый и достаточный для формирования монолитного шара из дисперсных частиц наполнителя.

При определении масло- и олигомероемкости фиксировали количество льняного масла и олигомера для перевода дисперсных наполнителей в монолитную дисперсную систему в форме шара.

По полученным данным измеряли объемный расход жидкости (льняное масло –  $V_{лм}$ , олигомер –  $V_{ол}$ ) на навеску дисперсных частиц с разным диаметром ( $m_n$ ) и рассчитывали масло- ( $X$ ) и олигомероемкость ( $Y$ ) в граммах на 100 г. дисперсного наполнителя:

$$X(Y) = \frac{\rho_{лм} \cdot V_{лм}}{m_n} \cdot 100, \quad (3)$$

где  $\rho_{лм}$ ,  $\rho_{ол}$  – плотность льняного масла (0,98 г/см<sup>3</sup>) или олигомера (1,16 г/см<sup>3</sup>).

Зависимости масло- и олигомероемкости наполнителей от диаметра дисперсных и удельной поверхности частиц приведены на рис. 1.

На зависимостях масло- ( $X$ ) и олигомероемкости ( $Y$ ) от диаметра дисперсных частиц диоксида кремния можно выделить четыре характерные области (рис. 1):

Область 1 – масло- ( $X$ ) и олигомероемкость ( $Y$ ) характеризуются минимальным значением и практически не изменяются с увеличением диаметра крупных частиц – более ~50 мкм;

Область 2 – масло- и олигомероемкость линейно возрастает в ~2 раза при уменьшении диаметра частиц с 50 мкм до 10 мкм;

Область 3 – начинается нелинейный рост масло- и олигомероемкости при уменьшении диаметра частиц с 10 мкм до 3 мкм (переходная область);

Область 4 – резкий рост масло- и олигомероемкости (в ~3 раза) при уменьшении диаметра частиц с 3 мкм до наноразмеров (45 нм).

Полученные данные по формированию дисперсных структур по данным масло- и олигомероемкости для частиц диоксида кремния с разным диаметром (от 50 нм до 250 мкм) и удельной поверхностью (от 0,01 до 50 м<sup>2</sup>/г) позволили впервые предложить полную технологическую классификацию дисперсных частиц по размерам:

1. Наночастицы (НЧ) – 1–100 нм;
2. Ультрадисперсные частицы (УДЧ) – 0,1–1,0 мкм;
3. Субмикрочастицы (СМикЧ) – 1–3 мкм;
4. Микрочастицы (МикЧ) – 3–10 мкм;
5. Макрочастицы (МакЧ) – 10–50 мкм;

6. Крупнодисперсные частицы (КрЧ) – 50–500 мкм;  
7. Зернистые наполнители (ЗН) – более 500 мкм.

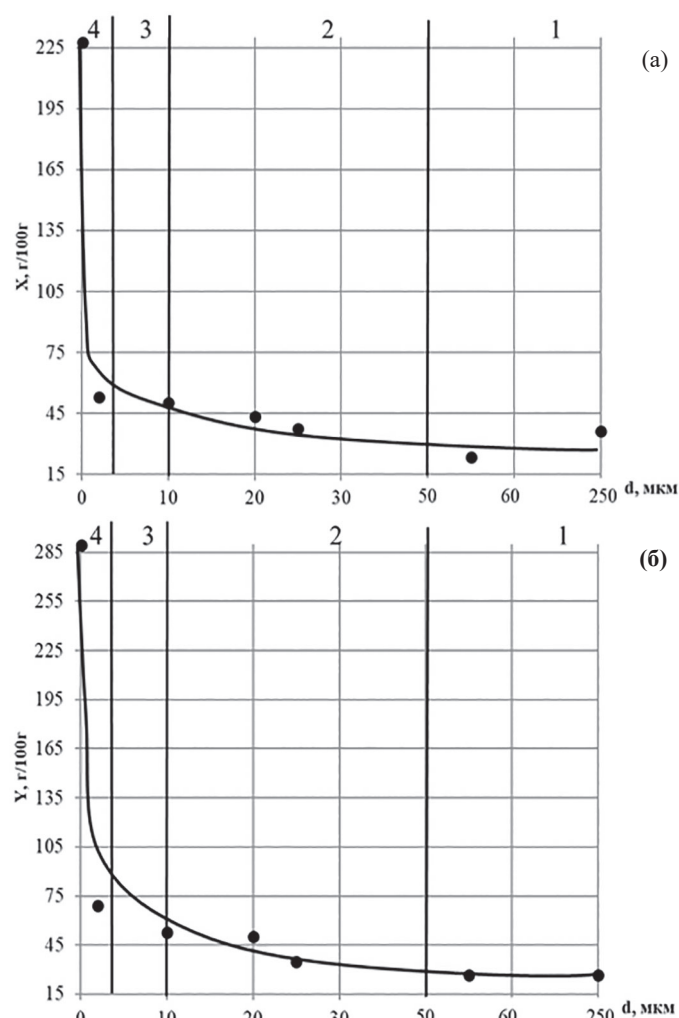


Рис. 1. Зависимость (а) олигомерности (б) для наполнителей на основе диоксида кремния разных марок от диаметра и удельной поверхности частиц.



Рис. 2. Классификация дисперсных частиц наполнителей по размерам.

На рис. 2 приведена технологическая классификация дисперсных частиц по размерам, полученная по данным масло- и олигомерности, используемая для создания ДНПКМ с разными типами и свойствами.

Таблица 1. Значения параметра  $\varphi_m$  для дисперсных наполнителей, полученные разными методами.

| Наполнитель марки | Размер частиц, мкм | $\rho_{нас}$ , г/см <sup>3</sup> | $\rho_{ист}$ , г/см <sup>3</sup> | Значение параметра $\varphi_m$ (об. д.), определенное по различным методикам |                   |              |               |
|-------------------|--------------------|----------------------------------|----------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|-------------------|--------------|---------------|
|                   |                    |                                  |                                  | $\rho_{нас}$                                                                 | кривая уплотнения | маслоемкость | олигомерность |
| МСП-250           | 250                | 1,47                             | 2,45                             | 0,62                                                                         | 0,62              | 0,55*        | 0,62          |
| МСП-55            | 55                 | 1,37                             | 2,45                             | 0,56                                                                         | 0,61              | 0,62         | 0,63          |
| Кварц А           | 25                 | 1,23                             | 2,65                             | 0,46                                                                         | 0,54              | 0,55         | 0,56          |
| Кварц 20          | 20                 | 0,89                             | 2,65                             | 0,46                                                                         | 0,50              | 0,51         | 0,51          |
| SIKRON SF300      | 10                 | 0,73                             | 2,65                             | 0,28                                                                         | 0,44              | 0,47         | 0,45          |
| SIKRON SF800      | 2                  | 0,42                             | 2,65                             | 0,16                                                                         | 0,40              | 0,37         | 0,39          |
| БС-50             | 50 нм              | 0,23                             | 2,30                             | 0,10                                                                         | 0,16              | 0,15         | 0,15          |

\*Примечание: наблюдается стекание льняного масла с крупных стеклянных частиц наполнителя ( $d_{cp} = 250$  мкм)

Предлагаемая технологическая классификация (рис. 2) хорошо коррелирует с ранее предложенным делением частиц по размерам, однако дополняет и расширяет ее возможности, и, самое главное, позволяет целенаправленно управлять процессом построения дисперсных структур разных типов и параметров, а также регулировать свойства ДНПКМ.

Построение различных типов структур ДНПКМ с частицами разных размеров базируется на экспериментальном определении параметра их упаковки (параметр  $\varphi_m$ ).

По данным масло- и олигомерности можно рассчитать значение параметра  $\varphi_m$  для дисперсных наполнителей по формулам [9–10]:

$$\text{в объемных долях} - \varphi_m = \frac{100 \cdot \rho_{лм}}{X \cdot \rho_n + 100 \cdot \rho_{лм}} [\text{об. д.}], \quad (4)$$

$$\varphi_m = \frac{100 \cdot \rho_{ол}}{Y \cdot \rho_n + 100 \cdot \rho_{ол}} [\text{об. д.}], \quad (5)$$

$$\text{в массовых долях} - \varphi_m = \frac{100}{X + 100} [\text{масс. д.}] \quad (6)$$

$$\varphi_m = \frac{100}{Y + 100} [\text{масс. д.}] \quad (7)$$

Значение параметра  $\varphi_m$  для дисперсных частиц разного размера можно также определить по известной массе ( $m_n$ ) и плотности ( $\rho_n$ ) дисперсного наполнителя, а также льняного масла ( $\rho_{лм}$  и  $\rho_{ол}$ ) или олигомера ( $m_{ол}$  и  $\rho_{ол}$ ) по формулам [9–10]:

$$\text{в объемных долях} - \text{по маслоемкости} \quad \varphi_m = \frac{m_n / \rho_n}{m_n / \rho_n + m_{лм} / \rho_{лм}} [\text{об. д.}] \quad (8)$$

$$\text{по олигомерности} \quad \varphi_m = \frac{m_n / \rho_n}{m_n / \rho_n + m_{ол} / \rho_{ол}} [\text{об. д.}] \quad (9)$$

$$\text{в массовых долях} - \text{по маслоемкости} \quad \varphi_m = \frac{m_n}{m_n + m_{лм}} [\text{масс. д.}] \quad (10)$$

$$\text{по олигомерности} \quad \varphi_m = \frac{m_n}{m_n + m_{ол}} [\text{масс. д.}] \quad (11)$$

В таблице 1 представлены обобщенные данные по значениям параметра  $\varphi_m$ , определенным по разным методикам: насыпной плотности, кривой уплотнения, маслоемкости и олигомерности для различных дисперсных наполнителей на основе диоксида кремния ( $\text{SiO}_2$ ) с разными размерами частиц.

Значения максимального содержания дисперсного наполнителя  $\varphi_m$  в ДНПКМ для крупных частиц ( $\sim 250$  мкм), полученные по насыпной плотности, кривой уплотнения, масло- и олигомерности, практически не различаются ( $\varphi_m \approx 0,62$  об.д.). Представленные данные хорошо коррелируют с теоретической кубической упаковкой шарообразных частиц – 0,64 об.д.

Однако при использовании низковязкого льняного масла наблюдается стекание жидкости с поверхности гладких крупных стеклянных сфер марки МСП-250, что приводит к уменьшению значения параметра  $\varphi_m$  с 0,62 до 0,55 об.д.

Для макро- (от 10 до 50 мкм) и микрочастиц (от 3 до 10 мкм) значения параметра  $\varphi_m$ , определенные по масло- и олигомерности, кривой уплотнения практически не отличаются друг от друга (не более  $\sim 10\%$ ), что позволяет судить о разрушении ароматных структур и агломератов из исходных частиц наполнителя при проведении эксперимента.

В случае наночастиц с размерами менее 100 нм наблюдается резкий рост удельной поверхности наполнителя, увеличение маслоемкости и олигомерности и снижение параметра  $\varphi_m$  до  $\sim 0,15$  об.д., причем значения параметра  $\varphi_m$  по олигомерности, маслоемкости и кривой уплотнения практически не различаются.

Значения максимального содержания дисперсного наполнителя, определенные по насыпной плотности для макро-, микро- и

наночастиц, не коррелируют с данными, полученными другими методами (таблица 1). Это связано с образованием арочных структур и агломератов из частиц наполнителя, что не позволяет получать достоверные значения параметра  $\varphi_m$ .

Из представленных данных следует, что метод определения параметра  $\varphi_m$  по насыпной плотности нежелательно использовать для частиц с размером менее ~50 мкм.

Анализ обобщенных данных, приведенных в таблице 1 и на рис. 1, позволяет описать зависимость параметра  $\varphi_m$ , определенного по масло- и олигомероемкости для исследованных наполнителей на основе диоксида кремния с разными размерами частиц, от значений X и Y [10] следующими уравнениями:

$$\text{ - по маслосоемкости - } \quad \varphi_m = 0,85 \cdot \exp\left(-\frac{X}{45}\right) + 0,15; \quad (12)$$

$$\text{ - по олигомероемкости - } \quad \varphi_m = 0,75 \cdot \exp\left(-\frac{Y}{60}\right) + 0,15. \quad (13)$$

Ниже приведены обобщенные значения параметра  $\varphi_m$  (об.д.) для твердых наполнителей с разными размерами частиц с близкой к шарообразной формой, которые хорошо согласуются с экспериментальными данными:

- наночастицы (НЧ) размером 1–100 нм –  $\varphi_m \approx 0,05\text{--}0,20$  об.д.

- ультрадисперсные (УДЧ) размером 0,1–1,0 мкм –  $\varphi_m \approx 0,20\text{--}0,255$  об.д.

- субмикрочастицы (СМикЧ) размером 1–3 мкм  $\varphi_m \approx 0,255\text{--}0,40$  об.д.

- микрочастицы (МикЧ) размером 3–10 мкм –  $\varphi_m \approx 0,40\text{--}0,45$  об.д.

- макрочастицы (МакЧ) размером 10–50 мкм –  $\varphi_m \approx 0,45\text{--}0,60$  об.д.

- крупные частицы (КрЧ) размером 50–500 мкм –  $\varphi_m \approx 0,62\text{--}0,64$  об.д.

- зернистые наполнители (ЗН) размером > 500 мкм –  $\varphi_m \approx 0,64$  об.д.

Технологическая классификация частиц по размерам и параметр  $\varphi_m$  позволяют рассчитать обобщенные и приведенные параметры дисперсной структуры ДНПКМ, провести их классификацию по структурному принципу и связать свойства материала с типом и обобщенными и приведенными параметрами структуры с использованием дисперсных частиц различного размера.

В таблице 2 представлены расчетные данные по составам ДНПКМ с разными типами дисперсной структуры (РС, ННС, СНС-1, СНС-2 и ВНС), различными размерами частиц и параметром  $\varphi_m$ , рассчитанные по формуле (1), которые охватывают практически весь диапазон современных полимерных композитов и дисперсий на любых полимерных матрицах.

Впервые предлагается алгоритм проектирования составов ДНПКМ с разными типами структур с использованием классификации дисперсных частиц по размерам, которые определены по данным масло- и олигомероемкости дисперсных наполнителей с разными размерами и распределением частиц по размерам [10].

Предложенные методики просты, доступны и эффективны, что позволяет решать задачи по созданию ДНПКМ с заданной структурой и комплексом требуемых свойств быстро, надежно и с минимальными затратами.

Полученные данные по классификации частиц по размерам можно использовать при проектировании составов композиционных материалов с заданным типом дисперсной структуры на металлической и керамической матрице.

**Таблица 2. Классификация частиц по размерам, тип структуры и содержание наполнителя ( $\varphi_m$ , об.д.) в ДНПКМ с частицами разного размера при различных значениях параметра  $\varphi_m$ .**

| Частицы наполнителя | Размер частиц, мкм | Параметр $\varphi_m$ , об.д. | Содержание наполнителя ( $\varphi_m$ , об. д.) для частиц разных размеров в ДНПКМ с разным типом структуры при заданном обобщенном параметре $\Theta$ , об.д. |                                              |                                                |                                                  |                                               |
|---------------------|--------------------|------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|------------------------------------------------|--------------------------------------------------|-----------------------------------------------|
|                     |                    |                              | РС<br>$\Theta = 0,99\text{--}0,90$<br>об.д.                                                                                                                   | ННС<br>$\Theta = 0,90\text{--}0,75$<br>об.д. | СНС-1<br>$\Theta = 0,75\text{--}0,45$<br>об.д. | СНС-2<br>$\Theta = 0,45\text{--}0,20$ ,<br>об.д. | ВНС<br>$\Theta = 0,20\text{--}0,0$ ,<br>об.д. |
|                     |                    |                              | при $\Theta = 0,95$ об.д.                                                                                                                                     | при $\Theta = 0,80$ об.д.                    | при $\Theta = 0,60$ об.д.                      | при $\Theta = 0,30$ об.д.                        | при $\Theta = 0,10$ об.д.                     |
| НЧ                  | 0,01–0,1           | 0,01                         | 0,001                                                                                                                                                         | 0,002                                        | 0,004                                          | 0,007                                            | 0,009                                         |
| УДЧ                 | 0,1–1,0            | 0,255                        | 0,013                                                                                                                                                         | 0,051                                        | 0,102                                          | 0,179                                            | 0,230                                         |
| СМикЧ               | 1,0–3,0            | 0,35                         | 0,02                                                                                                                                                          | 0,07                                         | 0,14                                           | 0,25                                             | 0,32                                          |
| МикЧ                | 3,0–10             | 0,45                         | 0,02                                                                                                                                                          | 0,09                                         | 0,18                                           | 0,32                                             | 0,41                                          |
| МакЧ                | 10–50              | 0,60                         | 0,03                                                                                                                                                          | 0,12                                         | 0,24                                           | 0,42                                             | 0,54                                          |
| КрЧ                 | 50–500             | 0,62                         | 0,03                                                                                                                                                          | 0,12                                         | 0,25                                           | 0,43                                             | 0,56                                          |
| ЗН                  | >500               | 0,64                         | 0,03                                                                                                                                                          | 0,13                                         | 0,26                                           | 0,45                                             | 0,58                                          |

## Литература

1. Кречетов Д.Д., Симонов-Емельянов И.Д. Структура, обобщенные параметры и реологические свойства дисперсно-наполненных термопластов // Материаловедение. – 2020. – №9. – С. 38–44.
2. Симонов-Емельянов И.Д., Пыхтин А.А. Нанозффект в эпокси-напокомпозитах // Пластические массы. – 2020. – №11–12. – С. 3–6.
3. Харламова К.И., Селезнева Л.Д., Симонов-Емельянов И.Д. Оптимизация размеров частиц и параметров структуры для получения дисперсно-наполненных полимерных композитов с максимальной прочностью // Пластические массы. – 2020. – №9–10. – С. 13–18.
4. Симонов-Емельянов И.Д. Учебное пособие. Физико-химические основы построения структуры дисперсно-наполненных полимерных композиционных материалов и нанокомпозитов. Москва: МИРЭА – Российский технологический университет. – 2020. – 75 С.
5. Симонов-Емельянов И.Д. Классификация дисперсно-наполненных полимерных композиционных материалов по типу решеток и структурному принципу // Клеи. Герметики. Технологии. – 2020. – Т. 1. – С. 8–13.
6. 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.
7. Кац Г.С., Милевски Д.В. Наполнители для полимерных композиционных материалов (справочное пособие). М: Химия, 1981. 736 с.
8. Симонов-Емельянов И.Д. Расчет составов дисперсно-наполненных полимерных композиционных материалов с различными типами решеток и параметрами структур // Пластические массы. – 2020. – №1–2. – С. 4–7.
9. Симонов-Емельянов И.Д., Харламова К.И., Дергунова Е.Р. Маслосоемкость дисперсных порошков и определение максимального содержания наполнителей в полимерных композиционных материалах Клеи. Герметики. Технологии. – 2022. – №3. – С.18–24.
10. Харламова К.И., Дергунова Е.Р., Симонов-Емельянов И.Д. / Олигомероемкость дисперсных наполнителей и расчет их максимального содержания в полимерных композиционных материалах // Пластические массы. – 2022. – №3–4. – С.21–24.
11. Гельфман М.И. Коллоидная химия, 2 изд./ М.И. Гельфман, О.В. Ковалевич, В.П. Юстров// Кемерово. – 2004. – 144 с
12. Крыжановский В.К. «Прикладная физика полимерных материалов», С-Пб: издательство СПбГТИ (ТУ). – 2001. – 261 с.