

# Максимальная плотность упаковки дисперсных частиц – основа для моделирования структуры полимерных композиционных материалов с заданной структурой и свойствами

## The maximum packing density of dispersed particles is a key parameter for the mathematical modeling of the structure of polymer composite materials

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

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

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

MIREA – a Russian Technological University (Lomonosov Institute of Fine Chemical Technologies), Moscow, Russia  
kharlamki@gmail.com

Основным параметром для моделирования различных типов дисперсной структуры полимерных композиционных материалов в соответствии с обобщенной моделью [1] является максимальная плотность упаковки частиц наполнителя в объеме (параметр  $\varphi_m$ , об.д.).

В работе представлены основные методики для определения максимальной плотности упаковки дисперсных наполнителей: по насыпной плотности, по кривой уплотнения, по масло- и олигомероемкости, по пористости (метод трех концентраций) наполненного материала.

Проведен сравнительный анализ полученных результатов для дисперсных наполнителей на основе диоксида кремния с частицами разного размера и предложены рекомендации по выбору методик для различных наполнителей.

*Ключевые слова:* параметр максимального содержания наполнителя, дисперсные наполнители, упаковка частиц, дисперсная структура, параметры структуры, полимерные композиционные материалы

The main parameter for modeling various types of dispersed structure of polymer composite materials in accordance with the generalized model [1] is the maximum packing density of filler particles in volume (parameter  $\varphi_m$ , volume fraction).

The paper presents various methods for determining the maximum packing density of dispersed fillers: by bulk density, by compaction curve, by oil and oligomer capacity, and by porosity (three-concentration method) of the filled material. A comparative analysis of the results obtained for dispersed fillers based on silicon dioxide with different particle sizes was conducted, and recommendations were provided for selecting the methods for different fillers.

*Keywords:* maximum filler content parameter, dispersed fillers, particle packing, dispersed structure, structure parameters, polymer composite materials

DOI: 10.35164/0554-2901-2025-04-62-66

### Введение

Создание полимерных композиционных материалов следует начинать с проектирования и расчета параметров гетерогенной гетерофазной структуры дисперсного наполнителя с целью получения ДНПКМ с заданным типом структуры и свойствами.

В научно-технической литературе представлены основные теоретические и технологические подходы к моделированию дисперсных структур, основанные на построении решеток из дисперсных частиц, теории перколяций и фрактальной геометрии [2–4].

Одними из наиболее эффективных теоретических обоснований для построения дисперсной структуры являются обобщенная модель дисперсно-наполненных полимерных композиционных материалов (ДНПКМ) и построение решеток из дисперсных частиц наполнителя в пространстве, представленные в монографии [1].

Для построения всех типов решеток и дисперсных структур ДНПКМ необходимо иметь данные о максимальной плотности упаковки частиц наполнителя, которую надежно можно определить в настоящее время практически только экспериментальными методами.

Параметр максимальной плотности упаковки ( $\varphi_m$ ) положен в основу проектирования дисперсных структур в терминах решеток и обобщенных параметров [4–8]. Такой подход позволяет совокупно учесть все основные характеристики дисперсных наполнителей: форму, размер, распределение частиц по размерам, упаковку, пористость, плотность и др.

Параметр упаковки дисперсных частиц ранее был использован в работах Б.И. Шкловского, Пьер-Жиль Де Жена, посвященных теории решеток и перколяции [5, 6]. Ими было предложено опи-

сание модельной структуры, создаваемой дисперсными частицами (шарообразными) с помощью двух основных параметров:  $Z$  – координационное число (число касаний частиц в объеме) и  $k_{уп}$  – плотность упаковки частиц в объеме.

В работах [1, 7] показано, что использование параметра  $\varphi_m$  является необходимым условием для корректного проектирования составов и структур ДНПКМ, в связи с тем, что его значение для каждого наполнителя зависит от множества факторов, таких как природа, форма, размер, распределение частиц по размерам, площадь поверхности, плотность частиц и др.

Параметр  $\varphi_m$  является «визитной карточкой» для каждого дисперсного наполнителя, который может быть определен экспериментально.

На кафедре химии и технологии переработки пластмасс и полимерных композитов Института тонких химических технологий имени М.В. Ломоносова (МИРЭА – Российский технологический университет) в течение многих лет ведутся работы по разработке подходов к моделированию реальных дисперсных структур полимерных композиционных материалов [4–8]. В ходе развития теоретических представлений о построении дисперсных структур коллективом кафедры под руководством профессора И.Д. Симонова-Емельянова был разработан и внедрен ряд методик для экспериментального определения максимальной плотности упаковки дисперсных частиц, каждая из которых обладает своими преимуществами и недостатками.

Определение параметра максимальной плотности упаковки дисперсных частиц может быть проведено следующими основными методами:

по насыпной плотности; по кривой уплотнения; по масло- и олигомерности; по пористости ДНПКМ (метод трех концентраций).

Целью данной статьи является анализ представленных методик определения параметра максимальной плотности упаковки для частиц разных размеров (от крупных до наночастиц) и рассмотрение их особенностей и областей применения.

*Методика определения максимальной плотности упаковки дисперсных частиц по насыпной плотности*

Самым доступным и наиболее распространенным в научной и технической литературе способом определения параметра максимальной плотности упаковки дисперсных частиц наполнителя ( $k_{уп}$ ) является метод, основанный на отношении насыпной плотности к истинной [7]:

$$k_{уп} = \frac{\rho_{нас}}{\rho_{ист}}, \quad (1)$$

где  $\rho_{нас}$  – насыпная плотность дисперсного наполнителя (ГОСТ 11035.1–93),  $\rho_{ист}$  – истинная плотность вещества наполнителя, определяемая пикнометрическим методом (ГОСТ 15139 – 69).

Однако, несмотря на достаточную простоту методики, она обладает значительными ограничениями в использовании. Так, с уменьшением размера дисперсных частиц с 250 мкм до 64 нм наблюдается существенное снижение значения их насыпной плотности – примерно в 12 раз (табл. 1). Такая тенденция, в первую очередь, связана с тем, что дисперсные частицы с диаметром менее 50 мкм склонны к образованию арочных структур и агломерации, что приводит к получению некорректных результатов для микро- и наночастиц [7].

Значения максимальной плотности упаковки ( $k_{уп}$ ) дисперсных наполнителей на основе диоксида кремния с разным размером частиц, полученные по насыпной плотности, приведены в табл. 1. Следует отметить, что коэффициент максимальной плотности упаковки ( $k_{уп}$ ) дисперсных частиц приравняется к максимальному содержанию дисперсной фазы в ДНПКМ (параметр  $\varphi_m$ ), т.е.  $k_{уп} \approx \varphi_m$ .

Анализ представленных данных подтверждает, что метод определения значения  $k_{уп}$  по насыпной плотности можно использовать только для крупных и макрочастиц с диаметром не менее 40–50 мкм (ошибка не более 10%).

Для получения истинных значений для дисперсных микро- и наночастиц необходимо использовать другие методы определения параметра  $k_{уп}$ , позволяющие разрушать арочные структуры и образующиеся агломераты.

*Методика определения максимального содержания дисперсного наполнителя по кривой уплотнения под давлением*

Определение максимальной плотности упаковки порошкообразных частиц по кривой уплотнения [6] является наиболее универсальным методом в связи с возможностью проведения исследований для дисперсных частиц в любом размерном диапазоне от крупных до наночастиц.

При уплотнении дисперсных наполнителей под давлением (кривые уплотнения) происходит увеличение насыпной плотности ( $\rho_{нас}$ ), зависящее от значения прикладываемого давления  $p_i = f(P_{упл})$ , в результате уменьшения свободного объема в гетерогенной структуре наполнителя, разрушения арочных структур, деформирования и разрушения рыхлых агломератов из частиц и, наконец, разрушения собственно частиц наполнителя.

Максимальная плотность упаковки дисперсного наполнителя  $k_{уп,i}$  является функцией давления уплотнения:

$$k_{уп,i} = \frac{\rho_{нас} \cdot f(P_{упл})}{\rho_{ист}}, \quad (2)$$

где  $f(P_{упл}) = \rho_i$  – текущее значение плотности как функция уплотняющего давления ( $P_{упл}$ ).

Примеры экспериментально полученных кривых уплотнения для дисперсных частиц диоксида кремния разного размера представлены на рис. 1. Для всех наполнителей начальной точкой отсчета на кривой уплотнения является значение насыпной плотности ( $\rho_{нас}$ ), определяемое согласно ГОСТ 21119.6–92.

Кривые уплотнения дисперсных порошков под давлением характеризуются наличием трех основных участков (рис. 1 и 2):

Участок I – линейная возрастающая зависимость  $k_{уп,i} = f(P_{упл})$ ; наблюдается уплотнение дисперсного порошка и уменьшение свободного объема в результате разрушения арочных структур;

Участок II – переходный, на котором с увеличением  $k_{уп,i}$  происходит уменьшение свободного объема в результате деформирования и разрушения рыхлых агломератов из частиц;

Участок III – с практически постоянным значением  $k_{уп,i} = f(P_{упл})$ , что характеризует формирование максимально плотной упаковки данного наполнителя в объеме (может происходить разрушение собственно частиц).

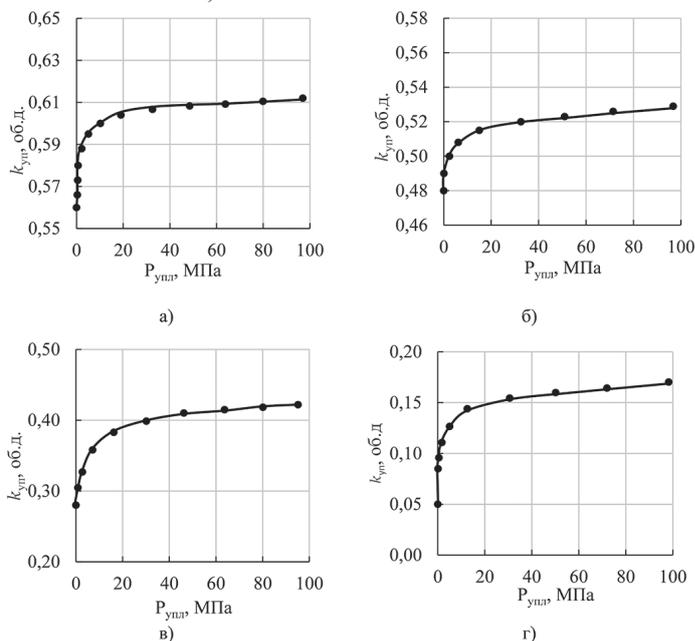


Рис. 1. Зависимости максимальной плотности упаковки дисперсного наполнителя от давления: а) для модельного наполнителя марки МСП-55 (микрошарики стеклянные полнотелые,  $d_{ср} = 55$  мкм); б) для макрочастиц (кварц молотый пылевидный марки А,  $d_{ср} = 20$  мкм); в) для микрочастиц (тонкомолотая кварцевая мука марки SF800,  $d_{ср} = 3$  мкм); г) для наночастиц (белая сажа марки БС-50,  $d_{ср} = 64$  нм).

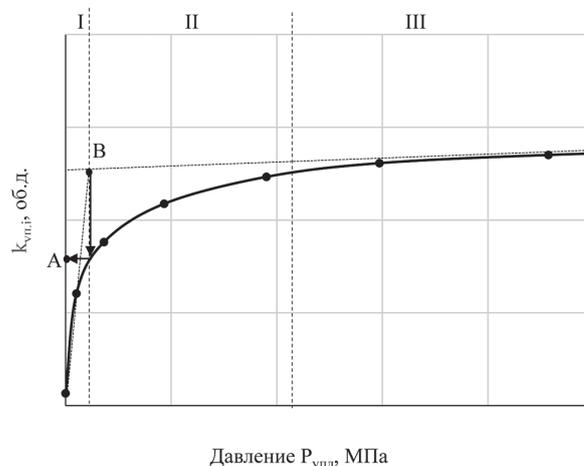


Рис. 2. Схема определения параметра максимальной упаковки  $k_{уп,m}$  дисперсного наполнителя по кривой уплотнения под давлением.

Многочисленные эксперименты показали, что за максимальную упаковку следует принять значение  $k_{уп,m}$  в точке (А), которая находится как проекция на ось ординат точки пересечения экспериментальной кривой и касательной (В), проведенной к участку III.

В табл. 1 представлены полученные значения максимальной плотности упаковки дисперсных частиц на основе диоксида кремния  $\text{SiO}_2$  разного размера.

В зависимости от размера частиц ( $d_{ср}$ ) их уплотнение (изменение объема) под давлением от насыпной до максимальной плотности упаковки составляет разное значение:

- для крупных и макрочастиц (25–50 мкм) – от 3 до 6%;
- для макрочастиц размером около 10 мкм – 30–35%;
- микрочастиц (~ 3 мкм) – примерно до 58%;
- наночастиц (менее 100 нм) примерно 60–70%.

С уменьшением размера частиц от 50 до 0,1 мкм доля объема, на который уплотняется дисперсный наполнитель, возрастает с 3 до 70%. Это доказывает, что происходит агломерация частиц

**Таблица 1. Значения максимальной плотности упаковки ( $k_{уп.м}$ , об.д.) для дисперсных наполнителей с разным размером частиц на основе SiO<sub>2</sub>, полученные разными методами.**

Наполнитель, марка	$d_{ср}$ , мкм	$\rho_{нас}$ , г/см <sup>3</sup>	$\rho_{ист}$ , г/см <sup>3</sup>	Значение параметра упаковки частиц $k_{уп.м}$ , об.д.		$\Delta$ , %
				по насыпной плотности	по кривой уплотнения	
МСП-250 – микрошарики стеклянные полнотелые товарная фракция 100–300 мкм	250	1,47	2,45	0,60	0,62	3
МСП-55 – микрошарики стеклянные полнотелые товарная фракция 40–70 мкм	55	1,37	2,45	0,56	0,60	6
Кварц молотый пылевидный марки 20	20	0,90	2,65	0,34	0,50	32
Кварц молотый пылевидный марки 10	10	0,73	2,65	0,28	0,43	35
Тонкомолотая кварцевая мука марки SIKRON SF300	10	0,73	2,65	0,28	0,44	36
Тонкомолотая кварцевая мука марки SIKRON SF800	3	0,42	2,65	0,16	0,38	58
Белая сажа БС – 50	0,064	0,12	2,30	0,05	0,16	69

Примечание:  $\Delta$ , % – ошибка эксперимента от значения, определенного по насыпной плотности.

дисперсных наполнителей с уменьшением их размера с образованием рыхлых, однако достаточно прочных агломератов из наночастиц (например, БС-50), которые выдерживают давление до 100 МПа и более. Причем выход кривой уплотнения на плато для дисперсных наполнителей во всем исследованном диапазоне размеров частиц наблюдается при давлении порядка 20–40 МПа, что связано в данном случае с физико-механическими характеристиками диоксида кремния.

Следует отметить, что для наночастиц ( $d \leq 100$  нм) значение параметра  $k_{уп.м}$  не превышает примерно 0,15–0,20 об.д., а пустотность достигает 80–85% и сохраняется даже при очень высоких давлениях – более 200 МПа.

Можно считать, что макроструктура дисперсного наполнителя, построенная из агломератов частиц сложной структуры, является стабильной и достаточно прочной, что связано с построением в пространстве квазикристаллических решеток, которые могут не разрушаться в технологических процессах смешения и переработки, особенно при небольших напряжениях и скоростях сдвига (примерно до  $10^2$  с<sup>-1</sup>).

Несмотря на универсальность данного метода, представленные данные не позволяют учесть внутреннюю открытую пористость дисперсных частиц, что может приводить к отклонению экспериментально установленного значения максимальной плотности упаковки от реального значения при построении структуры ДНПКМ. В этом случае полимерное связующее может заполнять, не заполнять или частично заполнять открытые поры дисперсной частицы, что оказывает влияние на структурообразование в ДНПКМ.

Таким образом, метод определения  $k_{уп.м}$  по кривой уплотнения отличается наибольшей универсальностью, доступностью и позволяет получить достаточно корректные значения  $k_{уп.м}$  для дисперсных наполнителей практически всех размеров – от крупных до nano.

#### Методика определения максимальной плотности упаковки дисперсного наполнителя по масло- и олигомероемкости

В промышленности широко используются методики для определения маслосоемкости и абсорбции для дисперсных частиц различной природы:

ГОСТ 21119.8-75 – Общие методы испытаний пигментов и наполнителей. Определение маслосоемкости;

ГОСТ 25699.5-90 – Углерод технический (ТУ) для производства резины. Метод определения абсорбции дибутилфталата.

Параметр маслосоемкости ( $X$ , г/г или г/100 г) твердых порошкообразных пигментов широко применяют для определения способности поглощать и удерживать низковязкую жидкость (масло) дисперсными порошками. В качестве рабочей жидкости при определении маслосоемкости, как правило, используют льняное рафинированное масло (ГОСТ 5791–81) с плотностью = 0,98 г/см<sup>3</sup> и вязкостью 0,929 Па·с, которое хорошо смачивает порошки пигментов (наполнителей) и применяется для приготовления масляных красок [7]. Особенностью данной методики можно считать возможность проникания низковязкой жидкости в пористую структуру наполнителя.

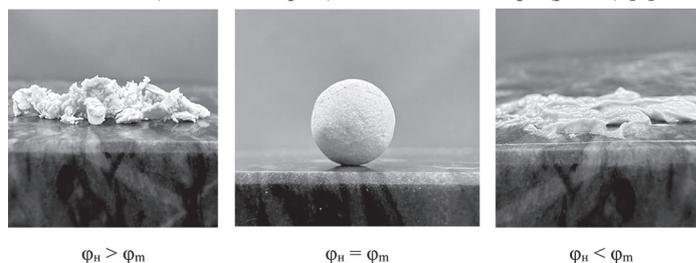
При определении маслосоемкости фиксируют количество льняного масла (дисперсионная среда) для перевода дисперсного порошка

пигмента (дисперсного наполнителя) в монолитную дисперсную систему («пасту»).

По полученным данным определяют объемный расход льняного масла ( $V_M$ ) на навеску дисперсного наполнителя ( $m_H$ ) и рассчитывают маслосоемкость ( $X$ ) в граммах на 100 г пигмента (наполнителя) по формуле (ГОСТ 21119.8 – 75; ISO 787/5–80) [7]:

$$X = \frac{\rho_M \cdot V_M}{m_H} \cdot 100 \text{ [г/100 г]} \quad (3)$$

Разработанная нами методика, в отличие от ГОСТ (образование пасты), заключается в использовании нового четкого геометрического критерия – формирование наполнителем, смоченного льняным маслом (или олигомером), монолитного шара (рис. 3) [7].



**Рис. 3. Формирование рассыпающейся композиции с  $\varphi_H > \varphi_M$  (а), монолитного шара с  $\varphi_H = \varphi_M$  (б) и текучей пасты с  $\varphi_H < \varphi_M$  (в) из дисперсного диоксида кремния с  $d = 3$  мкм при введении льняного масла [7].**

Нами впервые предложено по полученным экспериментальным данным о маслосоемкости ( $X$ ) или олигомероемкости дисперсных наполнителей рассчитывать значение параметра  $\varphi_m$ , по предлагаемым формулам [7]:

$$\varphi_m = \frac{100}{X + 100} [\text{масс. д.}], \quad (4)$$

$$\varphi_m = \frac{100 \cdot \rho_M}{X \cdot \rho_H + 100 \cdot \rho_M} [\text{об. д.}] \quad (5)$$

При определении маслосоемкости известны объем ( $V_M$ ), масса ( $m_M$ ), плотность льняного масла ( $\rho_M$ ) и наполнителя ( $m_H$  и  $\rho_H$ ), что позволяет рассчитать по этим данным значение параметра  $\varphi_m$ , обеспечивающего получение монолитной дисперсной системы (шар):

- в массовых долях:

$$\varphi_m = \frac{m_H}{m_H + m_M} [\text{масс. д.}], \quad (6)$$

- в объемных долях:

$$\varphi_m = \frac{\frac{m_H}{\rho_H}}{\frac{m_H}{\rho_H} + \frac{m_M}{\rho_M}} [\text{об. д.}] \quad (7)$$

Однако для более корректного определения значения параметра  $\varphi_m$  необходимо контролировать пористость, получаемого шара.

Таким образом, предлагаемая усовершенствованная методика по определению маслосоемкости дисперсных наполнителей (образование монолитного шара (ГОСТ 21119.8–75) впервые позволила по экспериментальным данным о маслосоемкости (олигомероемкости) с минимальными погрешностями определить параметр  $\varphi_m$ , который учитывает форму, размер, упаковку, удельную поверхность и распределение частиц по размерам для реальных наполнителей.

Таблица 2. Значения параметра  $\phi_m$  различных наполнителей на основе диоксида кремния, полученных разными методами.

Наполнитель, марка	$d_{ср}$ , мкм	Значение параметра упаковки частиц $k_{уп.м.}$ , об.д.		Значение параметра $\phi_m$ , об.д.	
		по насыпной плотности	по кривой уплотнения	по маслосемкости	по олигомероемкости
МСП-20	250	0,60	0,62	0,56	0,62
МСП-55	55	0,56	0,60	0,55	0,60
Кварц А	25	0,48	0,52	0,48	0,50
Кварц 20	20	0,34	0,50	0,48	0,50
Кварц 10	10	0,28	0,43	0,41	0,43
Кварцевая мука SF300	10	0,28	0,44	0,47	0,45
Кварцевая мука SF800	3	0,16	0,38	0,37	0,39
Белая сажа БС-50	0,064	0,05	0,16	0,15	0,16

Аналогично для определения параметра  $\phi_m$  углеродного наполнителя (ТУ) можно использовать данные по абсорбции дибутилфталата.

Преимуществом методики определения максимальной доли наполнителя (параметр  $\phi_m$ ) по маслосемкости ( $X$ ) или олигомероемкости является возможность её применения для жидких компонентов разной природы – мономеров, олигомеров, растворов полимеров и т.д. К сожалению, эта методика не может быть использована для высоковязких расплавов полимеров (термопластов).

На рис. 4 показана зависимость маслосемкости ( $X$ ) от размера частиц и параметра  $\phi_m$  от маслосемкости для исследованных наполнителей на основе диоксида кремния.

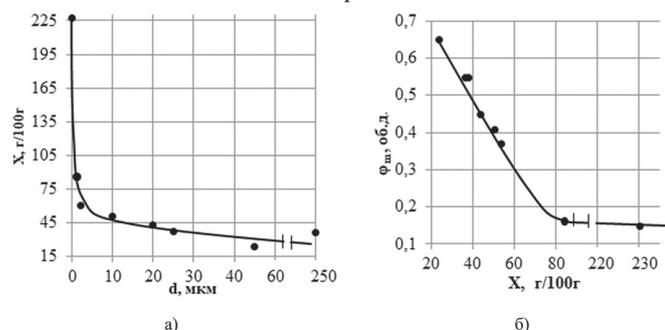


Рис. 4. Зависимость параметра  $X$  от размера частиц  $d_{ср}$  (а) и параметра  $\phi_m$  от маслосемкости  $X$  (б) для дисперсных наполнителей на основе диоксида кремния  $SiO_2$  с разным размером частиц.

Для создания ДНПКМ в качестве компонентов связующего часто используются жидкие низковязкие олигомеры, которые можно предложить для замены льняного масла при определении маслосемкости и параметра  $\phi_m$  [7–8].

Замена льняного масла на жидкий низковязкий олигомер (олигомероемкость) позволяет приблизить формируемую дисперсную систему к реальным условиям получения ДНПКМ и, таким образом, повысить надежность результатов.

*Определение максимального содержания дисперсного наполнителя по пористости ДНПКМ (метод трех концентраций)*

Широко известно, что пористость в дисперсно-наполненных полимерных композиционных материалах оказывает значительное влияние на комплекс физико-механических характеристик изделий. Причем образование пор в композиционных материалах возможно за счет введения пористых наполнителей, увеличения содержания наполнителя выше максимального и изменения технологических параметров.

При достижении высоких содержаний наполнителя в системе количества связующего становится недостаточно для заполнения пространства между частицами, что приводит к резкому увеличению пористости в дисперсно-наполненных полимерных композиционных материалах.

Метод определения максимального содержания наполнителя по трем концентрациям заключается в получении трех составов ДНПКМ с разной концентрацией наполнителя путем смешения его в расплаве с термопластом. Концентрации наполнителя выбираются таким образом, чтобы одна из них содержала наименьшее количество наполнителя (зависит от параметра  $\phi_m$ ), а две других – количество наполнителя, близкое или выше параметра  $\phi_m$ , определенного другим методом.

Для полученных ДНПКМ определяют плотность образцов и рассчитывают пористость по формуле:

$$\Pi = \left(1 - \frac{\rho_{экс}}{\rho_{ПКМ}}\right) * 100\%, \quad (8)$$

где  $\rho_{ПКМ}$  – расчетная плотность полимерного композиционного материала, а  $\rho_{экс}$  – экспериментально установленная плотность ДНПКМ.

Расчетную плотность ДНПКМ определяют по формуле:

$$\rho_{ПКМ} = \phi_H \cdot \rho_H + \phi_{ПКМ} \cdot \rho_{ПКМ}, \quad (9)$$

где  $\phi_H$  – объемное содержание дисперсного наполнителя,  $\rho_H$  – истинная плотность наполнителя,  $\phi_{ПКМ}$  – объемное содержание полимерной матрицы,  $\rho_{ПКМ}$  – истинная плотность ДНПКМ.

На рис. 5 показаны зависимости пористости  $\Pi = f(\phi_H)$  для ДНПКМ на основе ПЭНП и наполнителей с разным размером частиц при трех различных концентрациях, которые выбраны из условия формирования разной дисперсной структуры.

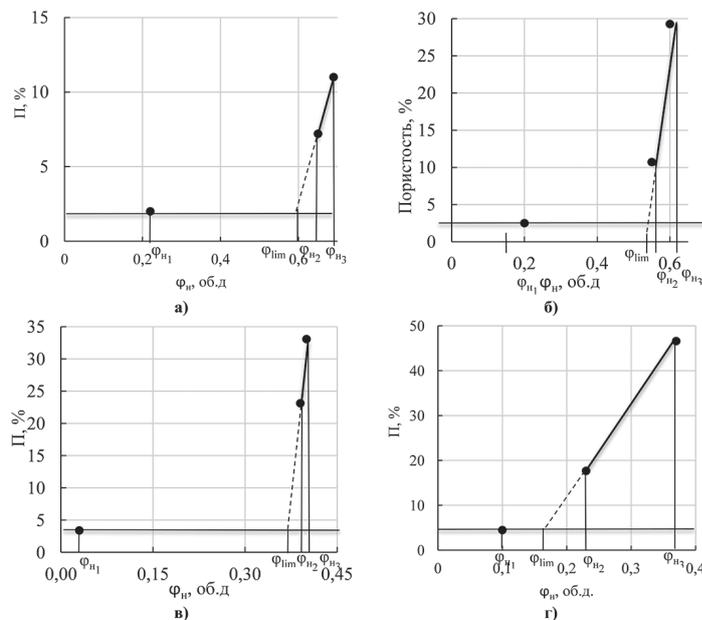


Рис. 5. Зависимость пористости ( $\Pi$ ) от содержания наполнителя ( $\phi_H$ ) для: а – модельного наполнителя МСП-55 с  $d_{ср} = 55$  мкм; б – макрочастиц кварца марки А с  $d_{ср} = 25$  мкм; в – микрочастиц SF800 с  $d_{ср} = 3$  мкм; г – наночастиц БС-50 с  $d_{ср} = 64$  нм.

Параметр  $\phi_m$  ( $\phi_{lim}$ ) определяют как точку пересечения прямой, проведенной через точку  $\phi_{H1}$  параллельно оси абсцисс, и прямой, проведенной через точки  $\phi_{H2}$  и  $\phi_{H3}$ .

Следует отметить, что метод определения параметра  $\phi_m$  по пористости ДНПКМ (трех концентрациях) является наиболее трудозатратным, а также требует для реализации дорогостоящего технологического оборудования. Однако этот метод позволяет определить максимальную плотность упаковки (содержание) дисперсных частиц в высоковязких термопластичных матрицах. Кроме того, проведение смешения полимерной матрицы с дисперсным наполнителем в ходе получения ДНПКМ позволяет разрушать агломераты и более качественно распределить частицы наполнителя в системе за счет напряжения сдвига и учесть, таким образом, изменение структуры агломерата в ДНПКМ.

Использование метода определения параметра  $\phi_m$  по пористости ДНПКМ будет оптимальным в случае, когда необходимо оценить упаковку дисперсного наполнителя в полимерных матрицах, отличающихся высокой вязкостью, а также он может служить для

оценки качества смешения и распределения частиц в полимерной матрице. С увеличением параметра  $\phi_m$  качество смешения дисперсного наполнителя с полимерной матрицей улучшается.

#### Заключение

Определение параметра максимальной плотности упаковки дисперсных частиц является необходимым и основным этапом проектирования составов с разными типами дисперсных структур и свойствами ДНПКМ.

Корректное определение параметра  $\phi_m$  в настоящее время возможно исключительно экспериментальными методами: по насыпной плотности, по кривой уплотнения, по масло- и олигомероемкости и по пористости (метод трех концентраций).

В качестве примера в табл. 2 представлены экспериментальные значения максимальной плотности упаковки для дисперсных наполнителей разного размера на основе диоксида кремния  $\text{SiO}_2$ , полученные различными методами.

Анализ данных табл. 2 подтверждает, что метод определения значения  $k_{\text{уп.м}}$  по насыпной плотности дисперсных наполнителей можно использовать только для крупных и макрочастиц с диаметром не менее 40–50 мкм (ошибка не более 10 %).

Метод определения  $k_{\text{уп.м}}$  по кривой уплотнения отличается наибольшей универсальностью и позволяет получить достаточно корректные значения  $k_{\text{уп.м}}$  для дисперсных наполнителей практически всех размеров – от крупных до нано.

Преимуществом методики определения максимальной доли наполнителя (параметр  $\phi_m$ ) по маслоемкости и олигомероемкости является возможность применения её для исходных жидких компонентов разной природы – мономеров, олигомеров, растворов полимеров и т.д.

Проведенные многочисленные исследования на наполнителях различной природы, формы и размера частиц позволили представить усредненные значения  $k_{\text{уп.м}}$  и параметра  $\phi_m$  (об.д.) для жестких наполнителей с разными размерами частиц для проектирования различных типов дисперсных структур и составов ДНПКМ (табл. 3).

**Таблица 3. Значения параметра  $\phi_m$  (об.д.) для дисперсных наполнителей с разным размером частиц.**

Частицы	Размер частиц	$k_{\text{уп.м}}, \phi_m, \text{об.д.}$
Наночастицы (НЧ)	1–100 нм	0,05–0,20
Ультрадисперсные (УДЧ)	0,1–1,0 мкм	0,20–0,255
Микрочастицы (МикЧ)	1–10 мкм	0,225–0,45
Макрочастицы (МакЧ)	10–50 мкм	0,45–0,60
Крупные частицы (КрЧ)	50–500 мкм	0,62–0,64
Зернистые частицы (ЗН)	> 500 мкм	~ 0,64

Таким образом, максимальная плотность упаковки дисперсных частиц наполнителя (параметры  $k_{\text{уп.м}}$  и  $\phi_m$ ) в ДНПКМ зависит главным образом от размера, распределения частиц по размерам и их формы, что необходимо учитывать при создании ДНПКМ с заданным типом дисперсной структуры.

Остается вопрос оценки внутренней пористости дисперсных наполнителей и ее влияния на параметр  $\phi_m$ , а также степени разрушения агломератов из частиц при смешении, что, несомненно, представляет интерес для будущих исследований по абсорбции различных жидкостей и модификации методов определения параметра максимальной плотности упаковки дисперсных частиц разной природы.

Работа выполняется в рамках реализации программы стратегического академического лидерства «Приоритет 2030» (соглашение от 31.03.2025 №075-15-2025-020, федеральный проект «Университеты для поколения лидеров» национального проекта «Молодежь и дети»).

#### Литература

1. Simonov-Emelyanov I.D., Kharlamova K.I. Physical and chemical fundamentals of building the structure of dispersed filled polymer composite materials and nanocomposites // Key Engineering Materials. 2021. V. 899. P. 694–700. DOI 10.4028/www.scientific.net/KEM.899.694.
2. Де Жен П. Идеи скейлинга в физике полимеров / пер. с англ. под ред. академика И.М. Лифшица. М.: Мир.1982. 368 с.
3. Шкловский Б.И., Эфрос А.Л. Теория протекания и проводимость сильно неоднородных сред // Успехи физических наук. 1975. Т. 117, вып. 3. С. 401–435.
4. Симонов-Емельянов И.Д., Кречетов Д.Д., Харламова К.И. Проектирование составов и типов структур литевых дисперсно-наполненных термопластов с хорошей перерабатываемостью и высокой прочностью // Пластические массы. 2021. №5–6. С. 10–12. DOI 10.35164/0554-2901-2021-5-6-10-12.
5. Брехова К.А., Симонов-Емельянов И.Д., Пыхтин А.А. Проектирование структуры и составов стойких к горению полимерных композиционных материалов с наполнителями-антипиренами на основе гидроксида магния // Тонкие химические технологии. 2023. Т. 18, №2. С. 109–122. DOI: 10.32362/2410-6593-2023-18-2-109-122.
6. Ушакова О.Б., Харламова К.И. Определение объемных характеристик дисперсных наполнителей и полимерных композиционных материалов [Электронный ресурс]: Практикум. М.: МИРЭА – Российский технологический университет, 2022 – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).
7. Симонов-Емельянов И.Д., Харламова К.И., Дергунова Е.Р. Маслоемкость дисперсных порошков и определение максимального содержания наполнителей в полимерных композиционных материалах // Клеи. Герметики. Технологии. 2022. №3. С. 18–24. DOI: 10.31044/1813-7008-2022-0-3-18-24.
8. Харламова К.И. Олигомероемкость дисперсных наполнителей и расчет их максимального содержания в полимерных композиционных материалах / Дергунова Е.Р., Симонов-Емельянов И.Д. // Пластические массы. 2022. №3–4. С. 21–24. DOI: 10.35164/0554-2901-2022-3-4-21-24.