

УДК 541.182.022:532.135

DOI: 10.18384/2949-5067-2024-1-6-19

## **ВЯЗКОУПРУГОСТЬ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК В ПОЛИМЕРНОЙ МАТРИЦЕ**

*Вековищев М. П., Кирсанов Е. А.*

*Государственный социально-гуманитарный университет  
140411, Московская обл., г. Коломна, ул. Зелёная, д. 30, Российская Федерация*

### **Аннотация**

**Цель:** рассмотреть вязкоупругие характеристики расплавов полимерных композитов с наполнителем в виде углеродных нанотрубок.

**Процедура и методы.** Проведена аппроксимация экспериментальных данных динамических измерений уравнениями структурной реологической модели на отдельных интервалах циклической частоты сдвиговых колебаний.

**Результаты.** Показана возможность применения уравнений структурной модели для описания реологических кривых в условиях линейной вязкоупругости. Установлена связь коэффициентов реологических уравнений с состоянием структуры композитного материала.

**Теоретическая и/или практическая значимость.** Предложены уравнения, которые способны аппроксимировать экспериментальные данные на отдельных интервалах частоты сдвиговых колебаний, соответствующих определённому структурному состоянию расплава полимера и полимерного композита.

**Ключевые слова:** углеродные нанотрубки, расплав полимерного композита, структурная реологическая модель, модули потерь, модули накопления

## VISCOELASTICITY OF CARBON NANOTUBES IN A POLYMER MATRIX

*M. Vekovichchev, E. Kirsanov*

*State University of Humanities and Social Studies*

*ulitsa Zelyonaya 30, Kolomna 140411, Moscow region, Russian Federation*

### **Abstract**

**Aim.** We consider the viscoelastic characteristics of melts of polymer composites with filler in the form of carbon nanotubes.

**Methodology.** The experimental data of dynamic measurements are approximated by the equations of a structural rheological model at separate intervals of the cyclic frequency of shear oscillations.

**Results.** The possibility of applying the equations of the structural model to describe rheological curves under conditions of linear viscoelasticity is shown. The relationship of the coefficients of rheological equations with the state of the composite material structure is established.

**Research implications.** Equations are proposed that are capable of approximating experimental data at separate frequency intervals of shear oscillations corresponding to a certain structural state of the polymer melt and polymer composite.

**Keywords:** carbon nanotubes, polymer composite melt, structural rheological model, loss modules, storage modules

### **Введение**

Углеродные нанотрубки являются перспективным материалом, который используется для создания новых композитных систем. Для обеспечения технологического процесса необходимо знать реологические свойства расплавов этих веществ. Композиты с углеродными нанотрубками демонстрируют неньютоновское поведение, в частности сдвиговое разжижение, и вязкоупругие свойства [1–4]. Они используются как добавки в красителях для струйных принтеров, в качестве материалов для 3D-принтеров [5; 6].

Реологическое поведение вязкоупругих текучих материалов описывают реологическими кривыми. Они являются основным источником сведений [7; 8] о процессах стационарного и осциллирующего течения в структурированных жидкостях (суспензиях, эмульсиях, расплавах и растворах полимеров).

Результаты динамических измерений позволяют получить зависимости модуля потерь  $G''$  и модуля накопления  $G'$  от циклической частоты  $\omega$ . Такие измерения производят при малых амплитудах сдвиговых колебаний  $\gamma_0$ , чтобы уменьшить воздействие сдвиговой деформации на структуру вещества. Предполагается, что в области линейной вязкоупругости структура вещества не изменяется при изменении частоты колебаний [7].

Описание реологических кривых подразумевает разделение полного интервала частот на участки с определённым характером реологического поведения [8]. В районе низких частот существует «вязкий или терминальный» район, где модуль потерь  $G''$  существенно больше модуля накопления  $G'$ . Для

предельно низких частот справедливы функциональные зависимости  $G'' \sim \omega$  и  $G' \sim \omega^2$ . Район «перехода к течению» содержит точку пересечения (точку кроссовера), где  $G'' = G'$ . В последующем районе «вязкоэластичного или каучукоподобного» поведения доминирует упругость ( $G'' < G'$ ), причём наклон кривой  $\log G'(\log \omega)$  настолько мал, что говорят о существовании  $G'$ -плато. В некоторых случаях величина модуля  $G''$  сначала уменьшается, а затем увеличивается с ростом частоты  $\omega$ , образуя некое «псевдоплато». В последующем районе «перехода» часто наблюдается вторая точка пересечения (точка кроссовера). В последующем районе «стеклования» модуль накопления  $G'$  имеет очень большую величину и слабо зависит от частоты. Предполагается, что характерные особенности кривых  $G'(\omega)$  и  $G''(\omega)$  связаны с реакцией системы на внешнюю периодическую деформацию, но сама структура вещества не изменяется на всём интервале частот.

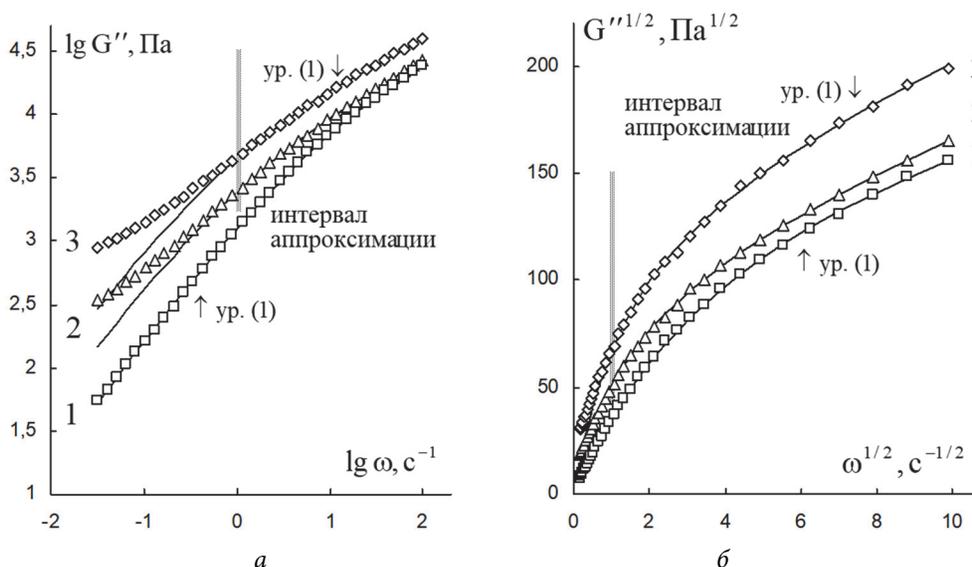
В предлагаемой работе проводится анализ реологических кривых расплава полимера и расплава полимерного композита с помощью реологических уравнений структурной модели.

### **Вязкое поведение при осциллирующем течении**

В работе [9] рассмотрено реологическое поведение полимерного композита, состоящего из многослойных углеродных нанотрубок (MWCNT) в расплаве полистирола (PS). Процесс подготовки однородного образца подробно описан в [9]. Средневесовая молекулярная масса полистирола равна 148000, среднечисловая молекулярная масса равна 48000. Динамические модули измерены с помощью ротационного вискозиметра с управляемой деформацией сдвига (CR – реометр) в геометрии параллельных пластин. Измерения проведены при температуре 210°C на интервале от 0,03 до 100 рад/с с амплитудой сдвиговой деформации  $\gamma_0 = 3\%$  (внутри интервала линейной вязкоупругости).

Экспериментальные результаты частотных зависимостей модулей  $G'(\omega)$  и  $G''(\omega)$  представлены на рис. 1, а и 3, а в традиционных двойных логарифмических координатах. В работе [9] отмечено существенное различие формы реологических кривых «чистого» расплава полистирола и композита с углеродными нанотрубками, особенно в области низкой циклической частоты. Это реологическое поведение объясняют наличием агрегатов нанотрубок и постепенным разрушением этих агрегатов при увеличении циклической частоты.

Будем рассматривать отдельно «вязкое» и «упругое» поведение полимерной системы. В рамках структурной реологической модели [10] предполагается, что в области линейной вязкоупругости происходит изменение структуры вещества под действием сдвига. На отдельных интервалах частот существуют различные режимы осциллирующего течения, связанные с характером изменения структуры в результате изменения амплитуды скорости сдвига  $\dot{\gamma}_0 \omega$ .



**Рис. 1 / Fig. 1.** Зависимость модуля потерь расплава полистирола и полимерного композита от циклической частоты при температуре 210°C и содержании углеродных нанотрубок 0% (1); 2 мас. % (2); 3 мас. % (3):

$a$  – в двойных логарифмических координатах;  $b$  – в корневых координатах /  
The dependence of the loss modulus of polystyrene melt and polymer composite on the cyclic frequency at a temperature of 210 ° C and the content of carbon nanotubes 0% (1); 2 wt. % (2); 3 wt. % (3):  $a$  – in double logarithmic coordinates;  $b$  – in root coordinates

Источник: [9].

Вязкое поведение можно описать в рамках структурной модели [10], используя реологические уравнения для двух режимов осциллирующего течения на отдельных участках реологической кривой. Каждому режиму соответствует определённое изменение структуры вещества. В полимерном композите возможны следующие процессы: разрушение и формирование зацеплений между макромолекулами; разрушение и формирование контактов между частицами-нанотрубками; разрушение и формирование контактов между нанотрубками и макромолекулами.

Если под действием сдвига зацепления (или контакты) разрываются (но не формируются за счёт сдвига), то уравнение для модуля потерь имеет вид [10]:

$$G''^{1/2} = \frac{g' \omega^{1/2}}{\omega^{1/2} + \chi'} + \eta_{\infty}'^{1/2} \omega^{1/2}. \quad (1, a)$$

Поскольку  $\eta' = G'' / \omega$ , то можно записать уравнение для динамической вязкости:

$$\eta'^{1/2} = \frac{g'}{\omega^{1/2} + \chi'} + \eta_{\infty}'^{1/2}. \quad (1, b)$$

Коэффициент агрегации  $g'$  описывает прочность зацеплений между макромолекулами или контактов между частицами. Коэффициент  $\chi'$  указывает на тенденцию образования рыхлых агрегатов частиц или ассоциатов макромолекул (при нулевом значении  $\chi'$  следует говорить о сетке, заполняющей весь образец). Коэффициент  $\eta_{\infty}'^{1/2}$  описывает вязкость, возникающую за счёт отбегания отдельных (индивидуальных) частиц или макромолекул.

Используя кинетическое уравнение разрушения/формирования агрегатов частиц (ассоциатов макромолекул), получим значения коэффициентов, присутствующих в уравнении (1):  $\chi' = k_0' / k_1'$ ;  $g' = B' N k_2' / k_1'$ . Величина  $N$  равна количеству частиц или макромолекул в единице объёма,  $B'$  – некоторый коэффициент, не зависящий от частоты колебаний.

Коэффициенты кинетического уравнения имеют следующий смысл:  $k_2'$  – константа скорости формирования агрегатов при столкновениях частиц;  $k_0'$  – константа скорости спонтанного разрушения агрегатов, например, в результате теплового движения;  $k_1'$  – константа скорости разрушения агрегата под действием растягивающих гидродинамических сил,  $k_3'$  – константа скорости формирования агрегатов частиц из одиночных частиц под действием сдвигового течения.

Если под действием гидродинамических сил возникают новые контакты или зацепления, то формируются новые агрегаты частиц или ассоциаты макромолекул. Этот процесс идёт одновременно с разрывом контактов или зацеплений.

Реологическое уравнение для этого режима осциллирующего течения имеет вид:

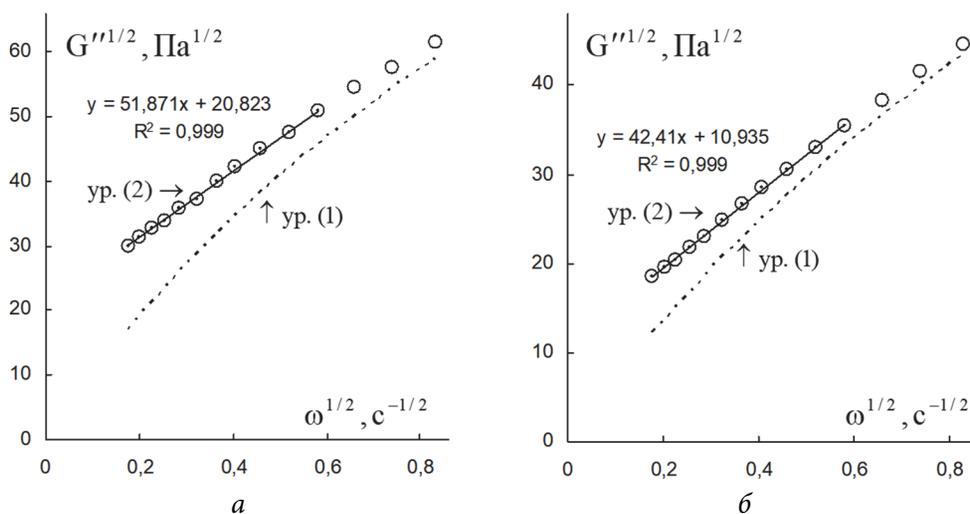
$$G''^{1/2} \approx g_0' \omega^{1/2} + \Delta G''^{1/2}, \quad (2)$$

$$\text{где } g_0' = \eta_{\infty}'^{1/2} + B' N k_3' / (k_3' + k_1'); \quad \Delta G''^{1/2} = B' N (k_2' - k_0') / (k_3' + k_1').$$

Коэффициент  $\Delta G''^{1/2}$  является отрицательным, если  $k_0' > k_2'$ , и положительным, если  $k_0' < k_2'$ . Если  $k_0' \approx k_2'$ , то реологическое поведение похоже на «ньютоновское» с практически постоянным значением динамической вязкости  $\eta'$ .

Рассмотрим зависимость модуля потерь исходного полимера и полимерного композита от частоты. Аппроксимация проводится методом нелинейной регрессии в пакете Excel. Кривая течения расплава полистирола описывается уравнением (1) на всём интервале измерений. При добавлении углеродных нанотрубок экспериментальная кривая может быть разделена на две части (рис. 1). В области высоких частот (от  $1 \text{ с}^{-1}$  до  $100 \text{ с}^{-1}$ ) экспериментальные данные хорошо аппроксимируются уравнением (1). Справедливость уравнения (1) подтверждается на графике в корневых координатах (рис. 1, б).

В области низких частот (от  $0,03 \text{ с}^{-1}$  до  $0,6 \text{ с}^{-1}$ ) экспериментальные данные хорошо аппроксимируются уравнением (2). Справедливость уравнения (2) подтверждается на графике в корневых координатах, построенном для интервала низких частот (рис. 2). Значения коэффициентов реологических уравнений приведены в табл. 1.



**Рис. 2 / Fig. 2.** Зависимость модуля потерь расплава полимерного композита от циклической частоты в корневых координатах на интервале низких частот при температуре 210°C:

а – содержание углеродных нанотрубок 3 мас. %; б – содержание нанотрубок 2 мас. % /  
 The dependence of the loss modulus of the polymer composite melt on the cyclic frequency in root coordinates in the low frequency range at a temperature of 210°C:  
 а – content of carbon nanotubes of 3 wt. %; б – nanotube content of 2 wt. %

Источник: [9].

Таблица 1 / Table 1

**Коэффициенты уравнений для модуля потерь в расплавах полистирола и полимерного композита при различных массовых концентрациях углеродных нанотрубок / The coefficients of equations for the loss modulus in polystyrene melts and polymer composite at different mass concentrations of carbon nanotubes**

$\Phi_w$ , %	0	2	3
$g'$ , $\text{Па}^{1/2}$	185,9	116,01	146,49
$\eta_{\infty}'^{1/2}$ , $(\text{Па с})^{1/2}$	3,03	6,67	7,36
$\chi'$ , $\text{с}^{-1/2}$	4,75	1,71	1,47
$g' / \chi'$ , $(\text{Па с})^{1/2}$	39,17	67,76	99,45
$\eta'^{1/2}(0)$ , $(\text{Па с})^{1/2}$	42,20	74,43	106,81
$g'_0$ , $(\text{Па с})^{1/2}$	-	42,41	51,87
$\Delta G''^{1/2}$ , $\text{Па}^{1/2}$	-	10,94	20,82

Источник: по данным авторов

В рамках структурной реологической модели [10] коэффициент  $g'$ , связан с прочностью зацеплений макромолекул и с прочностью контактов между частицами. В случае полимерного композита присутствуют контакты двух видов: между нанотрубками и между макромолекулами. Величина  $g'$ , вероятно, является усреднённой по всем видам контактов. Величина коэффициента  $\eta_{\infty}^{1/2}$  для расплава полимера связана с вязкостью, обусловленной движением отдельных макромолекул в отсутствие зацеплений. Соответствующая вязкость аналогична вязкости обычной низкомолекулярной жидкости. При увеличении концентрации добавленных частиц-нанотрубок коэффициент  $\eta_{\infty}^{1/2}$  увеличивается подобно коэффициенту вязкости «ньютоновской» суспензии.

Величина коэффициента компактности  $\chi'$  уменьшается с ростом концентрации нанотрубок. Коэффициент  $\chi'$  пропорционален вероятности спонтанного разрыва контактов, т.е. зацеплений между макромолекулами, контактов между нанотрубками, контактов между макромолекулами и нанотрубками.

Структурная часть динамической вязкости  $g'/\chi'$  может увеличиваться с ростом концентрации нанотрубок за счёт увеличения общего количества зацеплений и за счёт резкого уменьшения вероятности спонтанного разрыва контактов. Важно отметить, что структурная вязкость  $(g'/\chi')^2$  много больше суммарной вязкости независимых частиц  $\eta_{\infty}'$ .

Режим низких частот в нанокompозитах соответствует состоянию осциллирующего течения, при котором сосуществуют процессы разрывов контактов и формирования контактов под действием сдвига. Коэффициент  $\Delta G''^{1/2}$  является положительным, поэтому в соответствии с уравнением (2) получим  $k_0' < k_2'$ . Динамическая вязкость равна  $\eta' = G''/\omega$  и уменьшается с ростом частоты, что свидетельствует о преобладании процесса разрушения контактов над процессом формирования в результате сдвига.

### Упругое поведение при осциллирующем течении

Уравнение для модуля накопления в случае разрыва зацеплений имеет вид [10]:

$$G'^{1/2} = \frac{g'' \omega^{1/2}}{\omega^{1/2} + \chi''} + \eta_{\infty}''^{1/2} \omega^{1/2}, \quad (3, a)$$

Поскольку  $\eta'' = G'/\omega$ , то уравнение для динамической упругости  $\eta''$  приобретает вид

$$\eta''^{1/2} = \frac{g''}{\omega^{1/2} + \chi''} + \eta_{\infty}''^{1/2}. \quad (3, б)$$

Первое слагаемое представляет собой структурную часть модуля накопления (или динамической упругости), обусловленную упругостью ассоциатов макромолекул; второе слагаемое описывает часть модуля накопления (или динамической упругости), связанную с упругостью отдельных макромолекул.

Таким образом, макромолекулы и их «упругие» ассоциаты можно представить в виде некоторых «молекулярных пружин». С увеличением частоты колебаний и, соответственно, амплитуды скорости сдвига  $\omega\gamma_0$  зацепления разрываются, и упругость «молекулярных пружин» уменьшается. Соответственно, с ростом частоты уменьшается величина динамической упругости  $\eta'' = G'(\omega)/\omega$  и увеличивается величина  $G'$ .

Если агрегаты частиц (или ассоциаты макромолекул) отсутствуют, то динамическая упругость обеспечивается упругими свойствами отдельных частиц (или макромолекул), т. е. величиной  $\eta_0''^{1/2}$ . Используя кинетические уравнения, можно рассчитать значения коэффициентов в уравнении (3):  $\chi'' = k_0''/k_1''$ ;  $g'' = B''N k_2''/k_1''$ .

При низких циклических частотах количество «упругих» ассоциатов и зацеплений может увеличиваться с ростом частоты, поскольку возникают дополнительные упругие контакты за счёт гидродинамических сил при столкновениях макромолекул. Поэтому при низких частотах может наблюдаться участок, описываемый уравнением, линейным в корневых координатах, а именно:

$$G'^{1/2} \approx g_0'' \omega^{1/2} + \Delta G'^{1/2}. \quad (4)$$

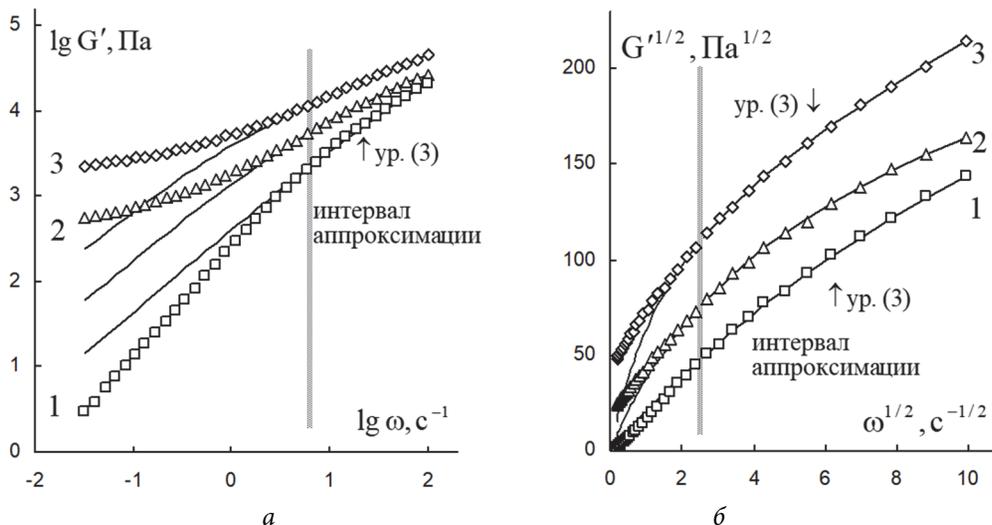
При дальнейшем уменьшении частоты колебаний в отдельных случаях появляется кривая степенной зависимости  $G' = g_2 \omega^n$ , где  $n \approx 2$ .

С помощью кинетических уравнений можно получить значения коэффициентов:

$$g_0'' = \eta_\infty''^{1/2} + B''N k_3''/(k_3'' + k_1''); \quad \Delta G'^{1/2} = B''N (k_2'' - k_0'')/(k_3'' + k_1'').$$

Коэффициент  $\Delta G'^{1/2}$  является отрицательным, если  $k_0'' > k_2''$ , и положительным, если  $k_0'' < k_2''$ .

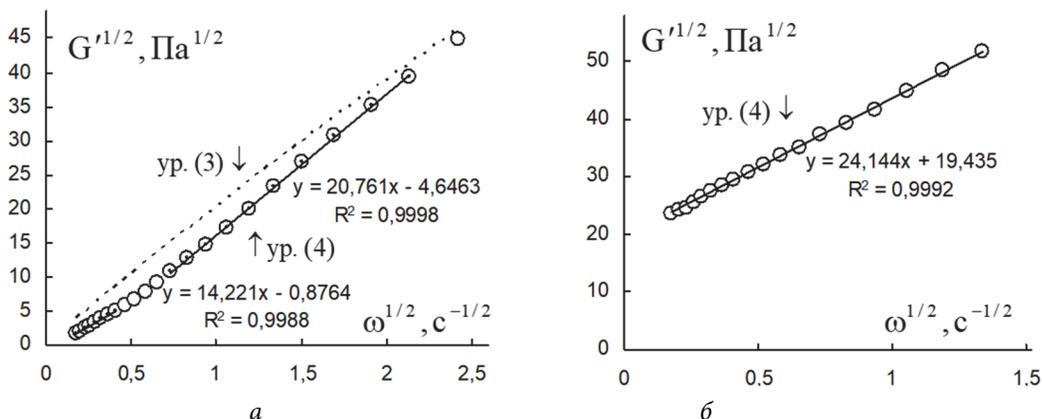
Кривые частотной зависимости модуля накопления (рис. 3) можно разделить на отдельные части, которые описываются различными реологическими уравнениями. Выбор интервалов аппроксимации можно осуществить, используя корневые координаты, как показано на рис. 3–5. Прямолинейные зависимости указывают на возможность применения уравнения (4). Экспериментальная зависимость, постепенно выходящая на «прямую» в области высоких частот, указывает на возможность применения уравнения (3). Значения коэффициентов реологических уравнений приведены в табл. 1.



**Рис. 3 / Fig. 3.** Зависимость модуля накопления расплава полистирола и полимерного композита от циклической частоты при температуре 210°C и содержании углеродных нанотрубок 0% (1); 2 мас. % (2); 3 мас. % (3):

$a$  – в двойных логарифмических координатах;  $b$  – в корневых координатах /  
 The dependence of storage modulus of polystyrene melt and polymer composite on the cyclic frequency at a temperature of 210°C and a carbon nanotube content of 0% (1); 2 wt. % (2); 3 wt. % (3):  $a$  – in double logarithmic coordinates;  $b$  – in root coordinate

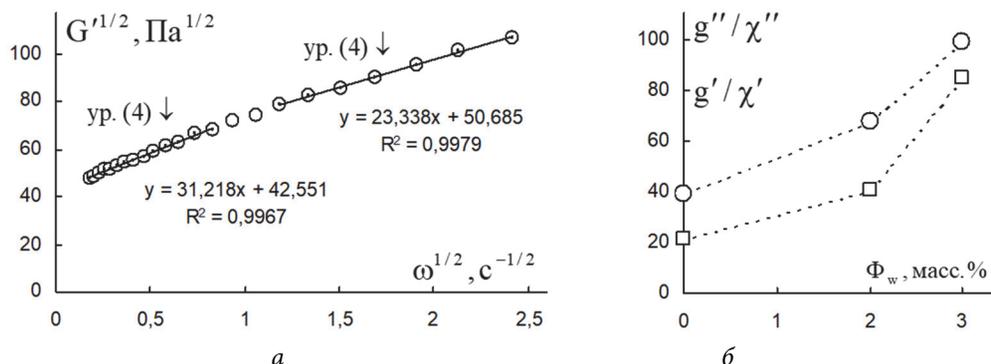
Источник: [9].



**Рис. 4 / Fig. 4.** Зависимость модуля накопления расплава полистирола и полимерного композита от циклической частоты в корневых координатах на интервале низких частот при температуре 210°C:

$a$  – содержание углеродных нанотрубок 0%;  $b$  – содержание нанотрубок 2 мас. % /  
 The dependence of storage modulus of polystyrene melt and polymer composite on the cyclic frequency in root coordinates at a low frequency range at a temperature of 210°C:  
 $a$  – the content of carbon nanotubes is 0%;  $b$  – the content of nanotubes is 2 wt. %

Источник: [9].



**Рис. 5 / Fig. 5.** Реологические характеристики расплава полистирола и полимерного композита при температуре 210°C:

*a* – зависимость модуля накопления от циклической частоты в корневых координатах на интервале низких частот при содержании нанотрубок 3 мас. %;

*б* – зависимость структурной части вязкости и структурной части упругости от массового содержания нанотрубок (мас. %) /

Rheological characteristics of polystyrene melt and polymer composite at a temperature of 210°C:

*a* – dependence of the storage modulus on the cyclic frequency in root coordinates in the low frequency range at a nanotube content of 3 wt. %;

*б* – dependence of the structural part of viscosity and the structural part of elasticity on the mass content of nanotubes (wt. %)

Источник: [9].

Таблица 2 / Table 2

**Коэффициенты уравнений для модуля накопления в расплавах полистирола и полимерного композита при различных массовых концентрациях углеродных нанотрубок / The coefficients of equations for the storage modulus in polystyrene melts and polymer composite at different mass concentrations of carbon nanotubes**

$\Phi_w$ %	0	2	3
$g''$ , $\text{Па}^{1/2}$	451,45	176,26	146,80
$\eta_{\infty}^{1/2}$ , $(\text{Па с})^{1/2}$	0	4,16	8,99
$\chi''$ , $\text{с}^{-1/2}$	21,18	4,31	1,72
$g''/\chi''$ , $(\text{Па с})^{1/2}$	21,31	40,89	85,13
$\eta^{1/2}(0)$ $(\text{Па с})^{1/2}$	21,31	45,05	94,12
$g_0''$ , $(\text{Па с})^{1/2}$	20,76	24,14	23,34
$\Delta G^{1/2}$ , $\text{Па}^{1/2}$	-4,65	19,44	50,69
$g_0''$ , $(\text{Па с})^{1/2}$	14,22	-	31,22
$\Delta G'^{1/2}$ , $\text{Па}^{1/2}$	-0,88	-	42,55

Источник: по данным авторов

Судя по табл. 2, «упругое» поведение при высоких частотах соответствует состоянию, когда структура только разрушается при увеличении частоты колебаний. При этом величина коэффициента  $g''$  существенно уменьшается по мере увеличения содержания нанотрубок. Вклад в упругость отдельных макромолекул в «чистом» полимере практически исчезает ( $\eta_{\infty}''^{1/2} \approx 0$ ). По мере увеличения числа нанотрубок в матрице коэффициент  $\eta_{\infty}''^{1/2}$  постепенно возрастает, т. е. отдельные нанотрубки вносят свой вклад в общую упругость вещества.

Коэффициент  $\chi''$ , пропорциональный вероятности разрыва «упругих» зацеплений, уменьшается с добавлением дисперсной фазы (нанотрубок). Это поведение можно объяснить уменьшением вероятности разрыва «упругих» контактов в смеси макромолекул и нанотрубок.

Структурная часть динамической упругости  $g''/\chi''$  увеличивается с ростом концентрации нанотрубок, демонстрируя увеличение количества «упругих» зацеплений макромолекул и нанотрубок.

На рис. 5, б показаны зависимости структурной части упругости и структурной части вязкости от концентрации нанотрубок. Видимая корреляция между этими зависимостями говорит об общей структурной природе вязких и упругих свойств в полимерных и композитных системах.

Режим низких частот в расплаве полистирола соответствует состоянию, при котором сосуществуют процессы разрывов упругих контактов и формирования контактов за счёт гидродинамических сил в процессе сдвигового течения. Величина  $\Delta G'^{1/2}$  отрицательна, т. е.  $k_0'' > k_2''$ . Динамическая упругость  $\eta'' = G'/\omega$  увеличивается с ростом частоты, т. е. доминирует процесс формирования контактов над процессом разрушения контактов в результате сдвига.

Наличие агрегатов нанотрубок в нанокompозитах изменяет состояние осциллирующего течения при низких частотах. Коэффициент  $\Delta G'^{1/2}$  становится положительным, поэтому в соответствии с уравнением (2) получим  $k_0'' < k_2''$ . Динамическая упругость равна  $\eta'' = G'/\omega$  и уменьшается с ростом частоты, что свидетельствует о преобладании процесса разрушения упругих контактов над процессом формирования в результате сдвига.

### Выводы

Вязкоупругое поведение полимерного композита, состоящего из многослойных углеродных нанотрубок в расплаве полистирола, описано с помощью структурной реологической модели. Показано, что реологические свойства расплава полистирола сходны со свойствами других полимеров и хорошо описываются уравнениями структурной модели. Наполнение расплава нанотрубками изменяет реологическое поведение, преимущественно в районе низких частот, увеличивая структурную составляющую динамической вязкости и динамической упругости.

*Статья поступила в редакцию 20.12.2023 г.*

## ЛИТЕРАТУРА

1. Ma A., Chinesta F., Mackley M. Rheological modeling of carbon nanotube aggregate suspensions // *Journal of Rheology*. 2009. Vol. 52. Iss. 6. P. 1311–1330. DOI: 10.1122/1.2982932.
2. A review of the microstructure and rheology of carbon nanotube suspensions / Ma A. W. K., Yearsley K. M., Chinesta F., Mackley M. R. // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part N: Journal of Nanoengineering and Nanosystems*. 2009. Vol. 222. Iss. 3. P. 71–94. DOI: 10.1243/17403499JNN153.
3. Lahlou S., Sehaqui R., Lahlou N. Thermal transfer of Nanofluids based on carbon nanotubes/glycerol and study of their rheological behavior // *MATEC Web of Conferences*. 2019. Vol. 286: 14<sup>th</sup> Congress of Mechanics (CMM2019). Article Number: 08003. DOI: 10.1051/mateconf/201928608003.
4. Degree of MWCNT suspension dispersity and its influence on rheology of cement pastes / Skripkiunas G., Karpova E., Bendoraitiene J., Barauskas I., Drochytka R. // *Selected papers of the 13th International Conference “Modern building materials, structures and techniques” (MBMST 2019, 16–17 May 2019, Vilnius, Lithuania)*. Vilnius: Vilnius Gediminas Technical University, 2019. P. 166–174. DOI: 10.3846/mbmst.2019.022.
5. Dresel A., Teipel U. Jet Dispersion of Multiwall Carbon Nanotubes and Correlation with Suspension Rheology // *Chemical Engineering Technology*. 2020. Vol. 43. Iss. 5 (Special Issue: Particle and Powder Technology: PARTEC 2019). P. 869–878. DOI: 10.1002/ceat.201900534.
6. Corker A. Formulation and Rheology of Carbon-based Materials for Printing of Conductive Three-dimensional Structures: PhD Thesis. University of Liverpool, 2022. 193 p.
7. Шрамм Г. Основы практической реологии и реометрии / пер. с англ. И. А. Лавыгина под ред. В. Г. Куличихина. М.: КолосС, 2003. 312 с.
8. Barnes H. A. *A Handbook of Elementary Rheology*. Institute of Non-Newtonian Fluid Mechanics. Aberystwyth: University of Wales, Cambrian Printers, 2000. 201 p.
9. Woo D. K., Kim B. C., Lee S. J. Preparation and rheological behavior of polystyrene/multi-walled carbon nanotube composites by latex technology // *Korea-Australia Rheology Journal*. 2009. Vol. 21. No. 3. P. 185–191.
10. Кирсанов Е. А., Матвеев В. Н. Вязкость и упругость структурированных жидкостей: монография. М.: Техносфера, 2022. 284 с.

## REFERENCES

1. Ma A., Chinesta F., Mackley M. Rheological modeling of carbon nanotube aggregate suspensions. In: *Journal of Rheology*, 2009, vol. 52, iss. 6, pp. 1311–1330. DOI: 10.1122/1.2982932.
2. Ma A. W. K., Yearsley K. M., Chinesta F., Mackley M. R. A review of the microstructure and rheology of carbon nanotube suspensions. In: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part N: Journal of Nanoengineering and Nanosystems*, 2009, vol. 222, iss. 3, pp. 71–94. DOI: 10.1243/17403499JNN153.
3. Lahlou S., Sehaqui R., Lahlou N. Thermal transfer of Nanofluids based on carbon nanotubes/glycerol and study of their rheological behavior. In: *MATEC Web of Conferences*, 2019, vol. 286: 14<sup>th</sup> Congress of Mechanics (CMM2019), article number: 08003. DOI: 10.1051/mateconf/201928608003.
4. Skripkiunas G., Karpova E., Bendoraitiene J., Barauskas I., Drochytka R. Degree of MWCNT suspension dispersity and its influence on rheology of cement pastes. In: *Selected papers of the 13th International Conference “Modern building materials, structures and*

- techniques*” (MBMST 2019, 16–17 May 2019, Vilnius, Lithuania). Vilnius, Vilnius Gediminas Technical University, 2019, pp. 166–174. DOI: 10.3846/mbmst.2019.022.
5. Dresel A., Teipel U. Jet Dispersion of Multiwall Carbon Nanotubes and Correlation with Suspension Rheology. In: *Chemical Engineering Technology*, 2020, vol. 43, iss. 5 (Special Issue: Particle and Powder Technology: PARTEC 2019), pp. 869–878. DOI: 10.1002/ceat.201900534.
  6. Corker A. Formulation and Rheology of Carbon-based Materials for Printing of Conductive Three-dimensional Structures: PhD Thesis. University of Liverpool, 2022. 193 p.
  7. Shramm G. *A Practical Approach to Rheology and Rheometry* (Rus. ed.: Lavygin I. A., transl., Kulichikhin V. G., ed. *Osnovy prakticheskoy reologii i reometrii*. Moscow, Kolos Publ., 2003. 312 p).
  8. Barnes H. A. *A Handbook of Elementary Rheology*. Institute of Non-Newtonian Fluid Mechanics. Aberystwyth, University of Wales, Cambrian Printers, 2000. 201 p.
  9. Woo D. K., Kim B. C., Lee S. J. Preparation and rheological behavior of polystyrene/multi-walled carbon nanotube composites by latex technology. In: *Korea-Australia Rheology Journal*, 2009, vol. 21, no. 3, pp. 185–191.
  10. Kirsanov Ye. A., Matveyenko V. N. *Vyazkost' i uprugost' strukturirovannykh zhidkostey* [Viscosity and elasticity of structured liquids]. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2022. 284 p.
- 

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Вековищев Михаил Петрович* – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики и химии Государственного социально-гуманитарного университета;  
e-mail: mpv.71@mail.ru

*Кирсанов Евгений Александрович* – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики и химии Государственного социально-гуманитарного университета;  
e-mail: Kirsanov47@mail.ru

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*Mikhail P. Vekovishchev*– Cand. Sci. (Phys.-Math.), Assoc. Prof., Department of Physics and Chemistry, State University of Humanities and Social Studies;  
e-mail: mpv.71@mail.ru

*Evgeny A. Kirsanov*–Cand. Sci. (Phys.-Math.), Assoc. Prof., Department of Physics and Chemistry, State University of Humanities and Social Studies;  
e-mail: Kirsanov47@mail.ru

### ПРАВИЛЬНАЯ ССЫЛКА НА СТАТЬЮ

Вековищев М. П., Кирсанов Е. А. Вязкоупругость углеродных нанотрубок в полимерной матрице // Вестник Государственного университета просвещения. Серия: Физика-Математика. 2024. № 1. С. 6–19.

DOI: 10.18384/2949-5067-2024-1-6-19.

### FOR CITATION

Vekovishchev M. P., Kirsanov E. A. Viscoelasticity of carbon nanotubes in a polymer matrix. In: *Bulletin of Federal State University of Education. Series: Physics and Mathematics*, 2024, no. 1, pp. 6–19.

DOI: 10.18384/2949-5067-2024-1-6-19.