

УДК 541. 182. 022: 532. 135

DOI: 10.18384/2310-7251-2023-1-6-16

НЕНЬЮТОНОВСКОЕ ТЕЧЕНИЕ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ В РАМКАХ СТРУКТУРНОЙ МОДЕЛИ

Вековищев М. П., Кирсанов Е. А.

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

Аннотация

Цель: рассмотреть реологическое поведение расплавов полимерных композитов с наполнителем в виде неорганических твёрдых частиц.

Процедура и методы. Проведена аппроксимация экспериментальных данных уравнениями структурной реологической модели на отдельных интервалах скорости сдвига.

Результаты. Показана связь коэффициентов реологических уравнений с состоянием структуры композитного материала.

Теоретическая и/или практическая значимость. Предложены уравнения, которые способны аппроксимировать экспериментальные данные на отдельных интервалах скорости сдвига, соответствующих определённому структурному состоянию расплава полимерного композита.

Ключевые слова: расплав полимерного композита, структурная реологическая модель, обобщённое уравнение течения, реологические кривые.

NON-NEWTONIAN FLOW OF POLYMER COMPOSITES WITHIN THE FRAMEWORK OF A STRUCTURAL MODEL

M. Vekovishchev, E. Kirsanov.

*State University of Humanities and Social Studies
ulitsa Zelenaya 30, Kolomna 140411, Moscow region, Russian Federation*

Abstract

Aim. We consider the rheological behavior of melts of polymer composites filled with inorganic solid particles.

Methodology. The experimental data are approximated by the equations of the structural rheological model on separate intervals of the shear rate.

Results. The relationship between the coefficients of rheological equations and the state of the structure of the composite material is demonstrated.

Research implications. Equations are proposed that are capable of approximating experimental data at individual shear rate intervals corresponding to a certain structural state of the polymer composite melt.

Keywords: melt of polymer composites, structural rheological model, generalized flow equation, rheological curves.

Введение

Различные наполнители используются в расплавах полимеров для улучшения свойств конечного продукта или процесса его изготовления [1; 2]. В первую очередь [3] было изучено влияние размеров, формы частиц и их концентрации на сдвиговую вязкость. Известно, что добавление частиц в текущую жидкость приводит к возмущению картины течения и увеличению вязкости [3]. Наиболее часто используют уравнение Догерти-Кригера, в следующем виде:

$$\eta^{1/2} = \eta_0^{1/2} \cdot \left[\frac{1}{1 - k\Phi} \right]^A.$$

В этом уравнении вязкость η стремится к бесконечности, если $k\Phi \rightarrow 1$. Таким образом, течение должно прекратиться, если концентрация достигнет величины $\Phi_m = 1/k$. Обычно, величину Φ_m сопоставляют с концентрацией частиц, образующих некоторую упаковку, препятствующую течению. Уравнение Догерти-Кригера (и сходные с ним уравнения) успешно используются для описания суспензий в ньютоновской дисперсионной среде.

Однако вязкость полимерной расплава зависит от скорости сдвига: величина $\eta_0(\dot{\gamma})$ уменьшается с увеличением скорости (сдвиговое разжижение). Обнаружено [3; 4], что с увеличением массовой или объёмной концентрации наполнителя сдвиговая вязкость возрастает, но форма кривой вязкости $\log \eta(\log \dot{\gamma})$, в общем, существенно не изменяется: уменьшается интервал «ньютоновского» поведения при низких скоростях, увеличивается интервал сдвигового разжижения при высоких скоростях сдвига.

В качестве наполнителей обычно используют частицы микронных размеров или наночастицы, например стеклянные сферы, неорганические соли и оксиды металлов [3; 4]. Было установлено, что вязкость увеличивается с увеличением концентрации наполнителя, причём увеличение наиболее заметно при низких скоростях сдвига. На интервале высоких скоростей кривая течения хорошо описывается степенным законом, т. е. наблюдается прямолинейный участок в двойных логарифмических координатах. На интервале низких скоростей иногда по-

является участок кривой, который описывается уравнением Кэссона, т. е. присутствует предельное напряжение сдвига. Вязкость изменяется при изменении размеров частиц [5].

Нами рассмотрено поведение расплавов полимерных композитов при различных концентрациях твёрдой дисперсной фазы с применением уравнений структурной реологической модели [6; 7].

Аппроксимация экспериментальных данных и обсуждение результатов

Экспериментальные реологические данные полимерного композита с наполнителем CaCO_3 в полиэтилене ($\text{CaCO}_3 / \text{PE}$) из работы [8] представлены на рис. 1, а. Исходный расплав полимера (PE) демонстрирует реологическое поведение со сдвиговым разжижением (shear-thinning) на участке средних скоростей сдвига. Наблюдается режим течения, сходный с течением среды с предельным напряжением сдвига (yield stress) на участке низких скоростей. Также наблюдается явление «срыва течения» на участке высоких скоростей сдвига (рис. 1, б), особенно при высокой концентрации наполнителя.

По мере увеличения массовой концентрации частиц вязкость полимерного композита увеличивается (рис. 1). Однако кривые вязкости достаточно близки по форме, что позволяет аппроксимировать экспериментальные данные обобщённым уравнением течения (ОУТ) на участке средних скоростей сдвига.

Участок сдвигового разжижения описывается обобщённым уравнением течения (ОУТ), полученным в рамках структурной реологической модели [6; 7]:

$$\tau^{1/2} = \frac{\tau_c^{1/2}}{\dot{\gamma}^{1/2} + \chi} \dot{\gamma}^{1/2} + \eta_c^{1/2} \dot{\gamma}^{1/2} \quad (1)$$

Первое слагаемое относится к потерям энергии вязкого течения при совместном движении агрегатов частиц и ассоциатов макромолекул, второе описывает потери энергии при движении отдельных частиц и отдельных макромолекул. Коэффициент компактности χ указывает на тенденцию к образованию бесконечно большого агрегата частиц (макромолекул) и связан с рыхлостью или компактностью отдельного агрегата частиц. Коэффициент τ_c характеризует степень агрегации системы и приобретает смысл предельного динамического напряжения сдвига только при условии $\chi \rightarrow 0$.

Значение структурной вязкости определяется величиной $\frac{\tau_c^{1/2}}{\chi}$, значение «нулевой» вязкости определяется величиной $\eta_c^{1/2}(0) = \frac{\tau_c^{1/2}}{\chi} + \eta_c^{1/2}$.

Аппроксимация уравнением (1) показана сплошной линией на рис. 1. Аппроксимация экспериментальных данных проводится с помощью минимизации суммы квадратов разностей $СКР = \sum (\tau_i^{1/2} - \tau_{i\text{расч}}^{1/2})^2$. Поэтому результаты аппрок-

симации удобно представить в корневых координатах (рис. 1, б). Интервал аппроксимации ограничен вертикальными линиями. Коэффициенты уравнения 1 приведены в табл. 1.

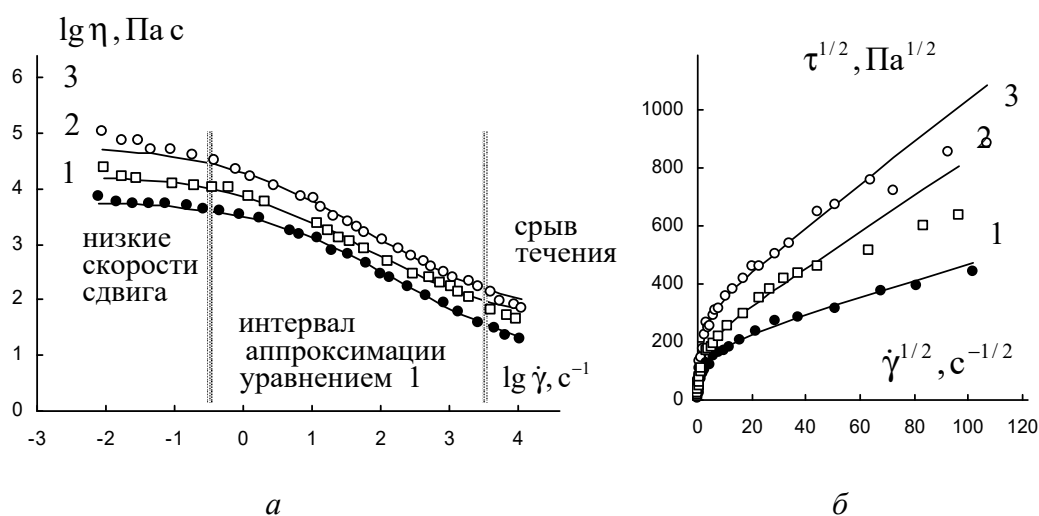


Рис. 1 / Fig. 1. Реологические характеристики полимерного композита CaCO_3 / PE:

a – зависимость сдвиговой вязкости от скорости сдвига в двойных логарифмических координатах при массовых концентрациях 0% (1); 18,2% (2); 30,4% (3); *б* – зависимость напряжения сдвига от скорости сдвига в корневых координатах / Rheological characteristics of a CaCO_3 / PE polymer composite: *a* – dependence of the shear viscosity on the shear rate in double logarithmic coordinates at mass concentrations of (1) 0%, (2) 18.2% and (3) 30.4%; *б* – dependence of the shear stress on the shear rate in root coordinates

Источник: [8].

На рис. 2, *a* представлены экспериментальные данные и результаты аппроксимации в виде кривых течения в двойных логарифмических координатах. Заметна тенденция к пластичному течению с предельным напряжением сдвига при низких скоростях. Чтобы проверить это предположение представим реологические данные в корневых координатах на интервале низких скоростей сдвига (рис. 2, *б*). Они описываются с хорошей точностью прямыми линиями.

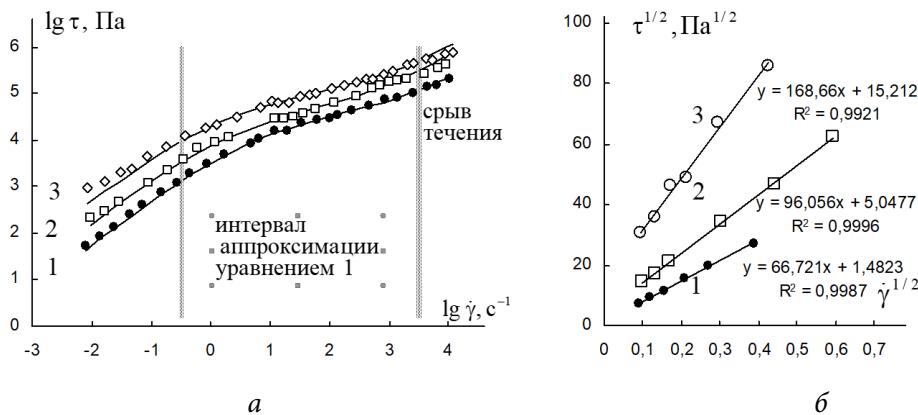


Рис. 2 / Fig. 2. Реологические характеристики полимерного композита $\text{CaCO}_3 / \text{PE}$: *a* – зависимость напряжения сдвига от скорости сдвига в двойных логарифмических координатах при на массовых концентрациях 0% (1); 18,2% (2); 30,4% (3); *б* – зависимость напряжения сдвига от скорости сдвига в корневых координатах на интервале низких скоростей сдвига / Rheological characteristics of $\text{CaCO}_3 / \text{PE}$ polymer composite: *a* – dependence of shear stress on shear rate in double logarithmic coordinates at at 0% mass concentrations 0% (1); 18.2% (2); 30.4% (3); *б* – dependence of shear stress on shear rate in root coordinates in the range of low shear rates

Источник: [8].

Таблица 1 / Table 1

Коэффициенты реологических уравнений (1) и (2), величина корня предельной нулевой вязкости, величина корня из структурной вязкости, рассчитанные для полимерного композита $\text{CaCO}_3 / \text{PE}$ /

Coefficients of rheological equations (1) and (2), the value of the root of the limiting zero viscosity, and the value of the root of the structural viscosity, calculated for the polymer composite $\text{CaCO}_3 / \text{PE}$

	средние скорости, Ур. 1			низкие скорости, Ур. 2			
Концентрация %	0	18,2	30,4		0	18,2	30,4
$\tau_c^{1/2}$, Па ^{1/2}	190,8	214,8	315,1	$\tau_{vc}^{1/2}$	1,48	5,05	15,2
$\eta_c^{1/2}$,(Па с) ^{1/2}	2,86	6,20	7,25	$\eta_{vc}^{1/2}$	66,7	96,1	168,7
χ , с ^{-1/2}	2,58	1,69	1,36	-	-	-	-
$\tau_c^{1/2} / \chi$	74,0	127,0	231,8	-	-	-	-
$\eta^{1/2}(0)$, (Па с) ^{1/2}	76,9	133,2	239,0	-	-	-	-

Источник: по данным авторов.

Поскольку «коэффициент вязкости» $\eta_c^{1/2}$ существенно больше «коэффициента агрегации» $\tau_c^{1/2}$ (рис. 2, б), то нельзя использовать обычное уравнение Кэссона, прямо вытекающее из обобщённого уравнения течения при $\chi = 0$.

Будем использовать другое уравнение для режима течения, в котором описываются два одновременно протекающих процесса разрушения и формирования структуры под действием сдвига [7]. Соответствующее уравнение имеет вид

$$\tau^{1/2} = \eta_{cv}^{1/2} \dot{\gamma}^{1/2} + \tau_{cv}^{1/2}, \quad (2)$$

причём коэффициенты уравнения связаны с константами скорости формирования и разрушения агрегатов частиц (или макромолекул) и количеством движущихся частиц $\tilde{N}$ в единице объёма: $\eta_{cv}^{1/2} = \eta_{\infty}^{1/2} + B\tilde{N}\tilde{k}_3 / (\tilde{k}_3 + \tilde{k}_1)$;

$$\tau_{cv}^{1/2} = B\tilde{N}(\tilde{k}_2 - \tilde{k}_0) / (\tilde{k}_3 + \tilde{k}_1).$$

Коэффициент $\tau_{cv}^{1/2}$ является отрицательным, если $\tilde{k}_0 > \tilde{k}_2$, и положительным, если $\tilde{k}_0 < \tilde{k}_2$. Поэтому на интервале низких скоростей возможны три вида реологического поведения. В первом случае вязкость увеличивается с ростом скорости сдвига (явление сдвигового затвердевания). Во втором случае вязкость уменьшается с ростом скорости сдвига, причём коэффициент $\tau_{cv}^{1/2}$ меньше или сравним по величине с коэффициентом $\eta_{cv}^{1/2}$. В третьем случае коэффициент $\tau_{cv}^{1/2}$ близок к нулю при условии $\tilde{k}_0 \approx \tilde{k}_2$, тогда реологическое поведение похоже на «ньютоновское» течение с практически постоянным значением сдвиговой вязкости η_{cv} . Тогда можно использовать уравнение ньютоновского течения в виде

$$\tau^{1/2} = \eta_N^{1/2} \dot{\gamma}^{1/2}. \quad (3)$$

Судя по табл. 1, режим с одновременным формированием и разрушением структуры под действием сдвига наблюдается как в исходном расплаве полимера, так и в расплаве с наполнителем.

В работе [9] приведены реологические данные для высокомолекулярного полимерного расплава с наполнителем в виде стеклянных сфер с радиусом 15 мкм при температуре 150 °С.

Экспериментальные данные представлены на рис. 3, а. Исходный расплав полимера показывает реологическое поведение со сдвиговым разжижением на участке средних скоростей сдвига; участок срыва течения не наблюдается за исключением одной экспериментальной точки при максимальной измеряемой скорости (рис. 4).

Режим течения, сходный с течением среды с предельным напряжением сдвига, хорошо виден на участке низких скоростей только при высокой объёмной концентрации $\Phi = 0,6$ (рис. 3, б). При более низких концентрациях при низких скоростях режим напоминает ньютоновский (рис. 3, а).

Тем не менее имеет смысл уточнить характер кривых течения на интервале низких скоростей, используя аппроксимацию с коэффициентом детерминации R^2 (рис. 5). Коэффициенты уравнений приведены в табл. 2.

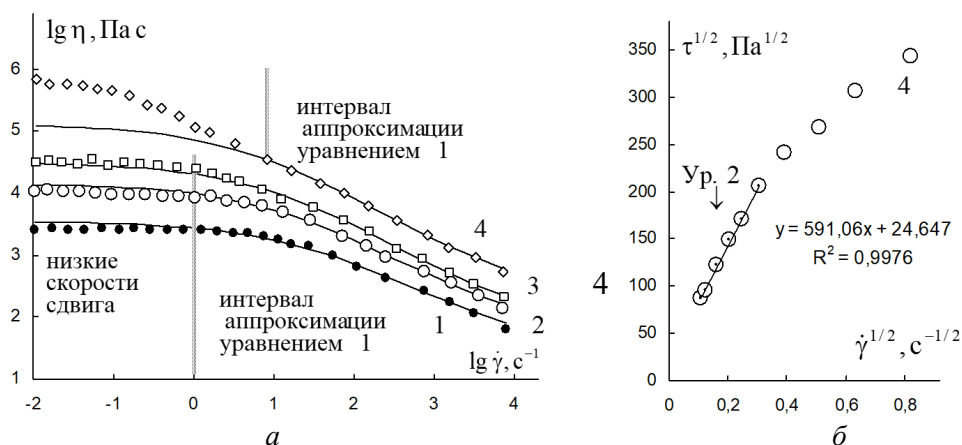


Рис. 3 / Fig. 3. Реологические характеристики полимерного композита, наполненного стеклянными сферами с радиусом 15 мкм при температуре 150 °C:

а – зависимость сдвиговой вязкости от скорости сдвига в двойных логарифмических координатах при объёмных концентрациях 0,0 (1); 0,26 (2); 0,35 (3); 0,60 (4); б – зависимость напряжения сдвига от скорости сдвига в корневых координатах при $\Phi = 0,6$ на интервале низких скоростей сдвига / Rheological characteristics of a polymer composite filled with glass spheres with a radius of 15 microns at a temperature of 150° C:

а – dependence of the shear viscosity on the shear rate in double logarithmic coordinates at volume concentrations of (1) 0.0, (2) 0.26, (3) 0.35, and (4) 0.60; б – dependence of the shear stress on the shear rate in root coordinates at $\Phi=0.6$ in the range of low shear rates

Источник: [9].

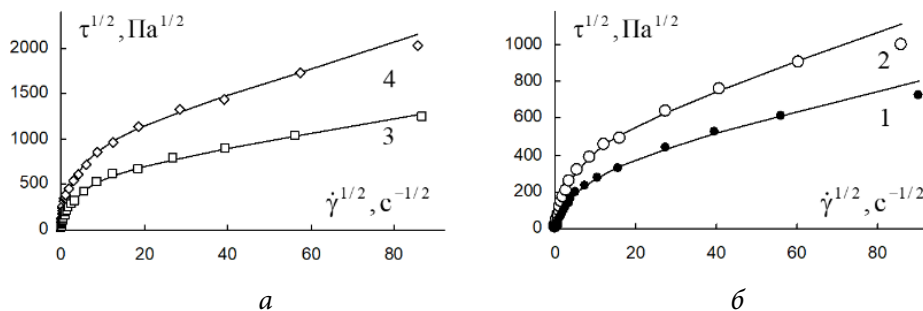


Рис. 4 / Fig. 4. Зависимость напряжения сдвига от скорости сдвига в корневых координатах на полном интервале измерений:

а – при объёмных концентрациях 0,35 (3); 0,60 (4); б – при объёмных концентрациях 0,0 (1); 0,26 (2) / Dependence of the shear stress on the shear rate in root coordinates over the full measurement interval:

а – at volume concentrations of (3) 0.35 and (4) 0.60; б – at volume concentrations of (1) 0.0 and (2) 0.26

Источник: [9].

Таблица 2 / Table 2

Коэффициенты реологических уравнений (1) и (2), значения структурной вязкости и «нулевой» вязкости (система СИ) для полимерного композита с наполнителем из стеклянных сфер с радиусом 15 мкм при температуре 150 °С / Coefficients of rheological equations (1) and (2) and values of structural viscosity and "zero" viscosity (SI system) for a polymer composite filled with glass spheres with a radius of 15 microns at a temperature of 150° C

Объёмная концентрация Φ	$\tau_c^{1/2}$	$\eta_c^{1/2}$	χ	$\eta^{1/2}(0)$	$\tau_c^{1/2} / \chi$	$\tau_{vc}^{1/2}$	$\eta_{vc}^{1/2}$
0,0	370,5	5,07	6,82	59,4	54,3	0,115	50,4
0,26	493,7	7,45	4,37	120,5	113,0	1,23	93,9
0,35	654,5	7,62	3,83	178,5	170,9	2,63	163,0
0,60	985,0	13,9	2,84	360,5	346,6	24,6	591,1

Источник: по данным авторов.

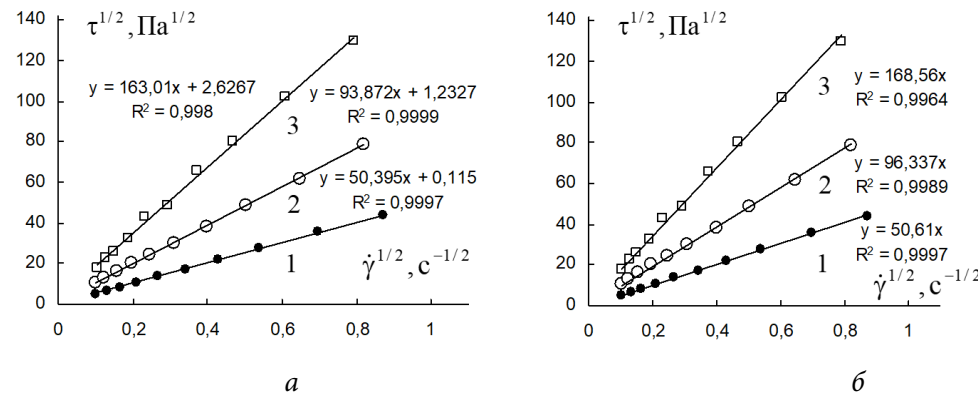


Рис. 5 / Fig. 5. Кривые течения в корневых координатах полимерного композита, наполненного стеклянными сферами, полученные на интервале низких скоростей сдвига при объёмных концентрациях 0,0 (1); 0,26 (2); 0,35 (3): а – аппроксимация по уравнению (2); б – аппроксимация по уравнению (3) как ньютоновской среды / Flow curves in root coordinates of a polymer composite filled with glass spheres, obtained in the range of low shear rates at volume concentrations of (1) 0.0, (2) 0.26, and (3) 0.35:

а – approximation by equation (2); б – approximation by equation (3) like a Newtonian medium
Источник: [9].

Можно видеть, что лучшее значение коэффициента детерминации R^2 получается при использовании уравнения (2), однако для исходного полимерного расплава течение можно считать ньютоновским.

Сравнение реологического поведения двух этих композитов показывает значительное сходство реологических характеристик их стационарного течения.

Как уже упоминалось в статьях других исследователей [3; 4], при увеличении концентрации частиц наполнителя вязкость композита увеличивается. Этот экспериментальный факт согласуется с изменением величины коэффициентов реологических уравнений структурной модели. Например, для интервала сдвигового разжижения при условии $\eta \gg \eta_c$ можно получить соотношение:

$$\frac{\eta(\Phi_2)}{\eta(\Phi_1)} = \left[\frac{\tau_{c2}^{1/2} (1 + \chi_1 / \dot{\gamma}^{1/2})}{\tau_{c1}^{1/2} (1 + \chi_2 / \dot{\gamma}^{1/2})} \right]^2. \quad (4)$$

Подстановка коэффициентов из табл. 1 и 2 показывает увеличение вязкости по мере увеличения концентрации частиц наполнителя.

В заключение отметим, что обобщённое уравнение течения использовалось для анализа кривых течения полимерного композита в работе [10].

Выводы

Рассмотрено реологическое поведение расплавов полимерных композитов с наполнителями в виде неорганических частиц с использованием уравнений структурной реологической модели. Установлены интервалы, где можно применять уравнения, соответствующие различным состояниям структуры полимерного композита. Показано, что изменение коэффициентов реологических уравнений с увеличением концентрации твёрдой дисперсной фазы согласуется с экспериментально обнаруженным увеличением вязкости композита. Коэффициент компактности χ уменьшается, что указывает на снижение вероятности спонтанного разрыва частиц, коэффициент предельной вязкости $\eta_c^{1/2}$ и коэффициент агрегации $\tau_c^{1/2}$ увеличиваются, что соответствует увеличению концентрации дисперсной фазы и увеличению размеров агрегатов.

Статья поступила в редакцию 01.02.2023 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Shenoy A. V. Rheology of filled polymer systems. Berlin: Springer Science + Business Media Dordrecht, 1999. 476 p.
2. Pamies R. Polymer rheology and processing of nano- and micro- composites // Materials. 2022. Vol. 15 (20). P. 7297–7300. DOI: 10.3390/ma15207297.
3. Barnes H. A. Review of the rheology of filled viscoelastic systems // Rheology reviews 2003 / eds. D. M. Binding and K. Walters. London, UK: British Society of Rheology, 2003. P. 1–36.
4. Rheological behaviour of highly filled materials for injection moulding and additive manufacturing: Effect of particle material and loading / Bek M., Gonzalez-Gutierrez J., Kukla Ch., Cresnar K. P., Maroh B., Perse L. S. // Applied Sciences. 2020. Vol. 10. P. 7993–8016. DOI: 10.3390/app10227993.
5. Bilalova E. A., Prut E. V., Kuznetsova O. P. Polypropylene composite material and its rheological and mechanical properties depending on the size of the filler CaCO_3 // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 525: Fourth interdisciplinary scientific forum with international participation “New materials and promising technologies”

- (27–30 November 2018, Moscow, Russian Federation). P. 012006–012011. DOI: 10.1088/1757-899X/525/1/012006.
6. Кирсанов Е. А., Матвеев В. Н. Неньютоновское течение дисперсных, полимерных и жидкокристаллических систем. Структурный подход: монография М.: Техносфера, 2016. 384 с.
 7. Кирсанов Е. А., Матвеев В. Н. Вязкость и упругость структурированных жидкостей: монография. М.: Техносфера, 2022. 284 с.
 8. Rheological behaviors of polymer melts and concentrated solutions. Part VI: Comparison of the material functions with yielding and thinning for polymeric suspensions with their experimental values / Song M., Zhou W., Hu G., Hu L. // *Journal of Materials Science and Technology*. 1999. Vol. 15. Iss. 3. P. 251–262.
 9. Rheological behaviour of filled polymeric systems I. Yield stress and shear-thinning effects / Poslinski A. J., Ryan M. E., Gupta R. K., Seshadri S. G., Frechette F. J. // *Journal of Rheology*. 1988. Vol. 32. Iss. 7. P. 703–721. DOI: 10.1122/1.549987.
 10. Федоров Ю. И., Михайлов А. С. Применение обобщенного уравнения течения для высоконаполненных полимерных систем // *Вестник технологического университета*. 2020. Т. 23. № 8. С. 90–93.

REFERENCES

1. Shenoy A. V. Rheology of filled polymer systems. Berlin, Springer Science + Business Media Dordrecht, 1999. 476 p.
2. Pamies R. Polymer rheology and processing of nano- and micro- composites, In: *Materials*, 2022, vol. 15 (20), pp. 7297–7300. DOI: 10.3390/ma15207297.
3. Barnes H. A. Review of the rheology of filled viscoelastic systems. In: Binding D. M., Walters K., eds. *Rheology reviews 2003*. London, UK, British Society of Rheology, 2003, pp. 1–36.
4. Bek M., Gonzalez-Gutierrez J., Kukla Ch., Cresnar K. P., Maroh B., Perse L. S. Rheological behaviour of highly filled materials for injection moulding and additive manufacturing: Effect of particle material and loading. In: *Applied Sciences*, 2020, vol. 10, pp. 7993–8016. DOI: 10.3390/app10227993.
5. Bilalova E. A., Prut E. V., Kuznetsova O. P. Polypropylene composite material and its rheological and mechanical properties depending on the size of the filler CaCO_3 . In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, vol. 525: Fourth interdisciplinary scientific forum with international participation “New materials and promising technologies” (27–30 November 2018, Moscow, Russian Federation), pp. 012006–012011. DOI: 10.1088/1757-899X/525/1/012006.
6. Kirsanov E. A., Matveenko V. N. *Nen'yutonovskoe techenie dispersnykh, polimernykh i zhidkokristallicheskich sistem. Strukturnyi podkhod* [Non-Newtonian flow of dispersed, polymer and liquid crystal systems. Structural approach]. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2016. 384 p.
7. Kirsanov E. A., Matveenko V. N. *Vyazkost' i uprugost' strukturirovannykh zhidkostei* [Viscosity and elasticity of structured liquids]. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2022. 284 p.
8. Song M., Zhou W., Hu G., Hu L. Rheological behaviors of polymer melts and concentrated solutions. Part VI: Comparison of the material functions with yielding and thinning for polymeric suspensions with their experimental values. In: *Journal of Materials Science and Technology*, 1999, vol. 15, iss. 3, pp. 251–262.

9. Poslinski A. J., Ryan M. E., Gupta R. K., Seshadri S. G., Frechette F. J. Rheological behaviour of filled polymeric systems I. Yield stress and shear-thinning effects. In: *Journal of Rheology*, 1988, vol. 32, iss. 7, pp. 703–721. DOI: 10.1122/1.549987.
10. Fedorov Yu I., Mikhaylov A. S. [Application of the generalized flow equation for highly filled polymer systems]. In: *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta* [Herald of Technological University], 2020, vol. 23, no. 8, pp. 90–93.

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. Неньютоновское течение полимерных композитов в рамках структурной модели // Вестник Московского государственного областного университета. Серия: Физика-математика. 2023. № 1. С. 6–16.
DOI: 10.18384/2310-7251-2023-1-6-16.

FOR CITATION

Vekovishchev M. P., Kirsanov E. A. Non-Newtonian flow of polymer composites within the framework of a structural model. In: *Bulletin of the Moscow Region State University. Series: Physics and Mathematics*, 2023, no. 1, pp. 6–16.
DOI: 10.18384/2310-7251-2023-1-6-16.