

## НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 541.182.022:532.135

**РЕОЛОГИЯ СТРУКТУРИРОВАННЫХ ЖИДКОСТЕЙ.  
«НЬЮТОНОВСКОЕ» ПОВЕДЕНИЕ****Владимир Николаевич Матveenко<sup>1</sup>, Евгений Александрович Кирсанов<sup>2</sup>**<sup>1</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, химический факультет, кафедра коллоидной химии<sup>2</sup> Московский государственный областной социально-гуманитарный институт**Автор, ответственный за переписку:** Владимир Николаевич Матveenко,  
13121946VNM@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-6142-5710>

**Аннотация.** Рассмотрено поведение неньютоновских жидкостей с небольшой молекулярной массой (жидкий парафин, силиконовое масло, масло FC70), в которых наблюдается сдвиговое разжижение при низкой скорости сдвига. В большом интервале высоких значений скорости сдвига наблюдается поведение, сходное с «ньютоновским», где сдвиговая вязкость практически постоянна. Предложено объяснение этого вида «ньютоновского» течения с точки зрения структурной реологической модели.

**Ключевые слова:** реология, структурная реологическая модель, «ньютоновское» поведение, высокая скорость сдвига

DOI: 10.55959/MSU0579-9384-2-2023-64-6-542-548

**Благодарности.** Авторы выражают благодарность заведующему кафедрой коллоидной химии профессору В.Г. Сергееву за поддержку и обсуждение настоящей работы.

**Финансирование.** Исследование выполнено в рамках бюджетного финансирования Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова, химический факультет № ЦИТИС: 121031300084-1.

**Для цитирования:** Матveenко В.Н., Кирсанов Е.А. Реология структурированных жидкостей. «Ньютоновское» поведение // Вестн. Моск.ун-та. Сер. 2. Химия. Т. 64. № 6. С. 542–548.

## ORIGINAL ARTICLE

**RHEOLOGY OF STRUCTURED LIQUIDS. “NEUTONIAN” BEHAVIOR****Vladimir N. Matveenko<sup>1</sup>, Eugene A. Kirsanov<sup>2</sup>**<sup>1</sup> Department of Colloidal Chemistry, Faculty of Chemistry, Lomonosov Moscow State University<sup>2</sup> Moscow State Regional Socio-Humanitarian Institute**Corresponding author:** Vladimir N. Matveenko, 13121946VNM@gmail.com,  
<https://orcid.org/0000-0002-6142-5710>

**Abstract.** The behavior of low molecular weight non-Newtonian fluids (liquid paraffin, silicone oil, FC70 oil) in which shear thinning is observed at low shear rates is considered. Over a large range of high shear rates, a behavior similar to the “Newtonian” behavior is observed, where the shear viscosity is practically constant. An explanation of this type of “Newtonian” flow from the point of view of a structural rheological model is proposed.

**Keywords:** rheology, structural rheological model, “Newtonian” behavior, high shear rates.

**Financial Support.** The study was carried out within the framework of budget financing of Lomonosov Moscow State University, Department of Chemistry № 121031300084-1.

**For citation:** Matveenko V.N., Kirsanov E.A. Rheology of structured liquids. “Newtonian” behavior // Vestn. Moscow University Ser. 2. Chemistry. T. 64. № 6. S. 542–548.

Сосуществование ньютоновского и неньютоновского участков на одной кривой вязкости обнаружено достаточно давно [1]. Часто приводят схематические изображения, где линейное ньютоновское поведение имеется на участках низких и высоких значений скорости, а между ними находится участок снижения вязкости (сдвиговое разжижение). Первые догадки о природе такого ньютоновского течения привели к представлениям о максимальной ньютоновской вязкости неразрушенной структуры системы и о минимальной ньютоновской вязкости полностью разрушенной структуры. Такое объяснение неявно подразумевает, что постоянство вязкости обусловлено постоянством некоторой структуры (например, агрегатов в суспензии) на конечном интервале скорости сдвига. В случае полимерных систем участок максимальной вязкости был сопоставлен с максимальным числом зацеплений между макромолекулами и беспорядочной ориентацией единиц течения. Появление участка минимальной вязкости связывали с разрывом зацеплений и ориентацией макромолекул в сдвиговом течении при высокой скорости сдвига.

Дальнейшие исследования показали, что в полимерных системах участок с практически постоянной вязкостью часто встречается при низкой скорости сдвига, но крайне редко при высокой. Вместо этого наблюдается резкое уменьшение вязкости при достижении постоянного напряжения сдвига (срыв течения) или увеличение вязкости с ростом скорости сдвига (сдвиговое затвердевание).

В рамках структурной реологической модели [2, 3] изменение вязкости с ростом скорости сдвига объясняется изменением структуры вещества, выраженной через число частиц в агрегатах или числом макромолекул в ассоциатах. Рассмотрим более подробно явление «ньютоновского» течения при высокой скорости сдвига в молекулярных жидкостях с достаточно низкой молекулярной массой, где такое «ньютоновское» поведение хорошо выражено.

### Жидкий парафин

В работе [4] исследовано стационарное течение наножидкости на основе жидкого парафина. Вязкость определена с помощью реометра Брукфилда с цилиндрическим ротором. Экспериментальные данные для жидкого парафина при 40 °С представлены на рис. 1, а и представлены в табл. 1. Используемый [4] жидкий парафин состоит из смеси углеводородов, содержащих от десяти до ста и более атомов углерода на одну молекулу (температура плавления 12 °С). Нелинейное поведение в виде сдвигового разжижения наблюдается при низкой скорости сдвига; при высокой скорости сдвига течение можно считать ньютоновским с достаточно высокой точностью (рис. 1, б).

Участок сдвигового разжижения описывается обобщенным уравнением течения (ОУТ), полученным в рамках структурной реологической модели [2, 3]:

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

Физический смысл коэффициентов реологического уравнения описан в рамках структурной реологической модели. Коэффициент агрегации  $\tau_c^{1/2}$  описывает агрегацию частиц или макромолекул в неких группировках (агрегаты или ассоциаты) и пропорционален силе сцепления между частицами. Коэффициент вязкости Кэссона  $\eta_c^{1/2}$  описывает предельно низкую вязкость полностью дезагрегированной системы частиц. Коэффициент компактности  $\chi$  указывает на степень рыхлости или компактности агрегатов частиц и равен нулю в случае сетки частиц, занимающей весь объем образца. Коэффициент компактности  $\chi$  пропорционален вероятности спонтанного разрыва связи между частицами, например, за счет теплового движения.

Значения коэффициентов реологических уравнений представлены в табл. 2. В этом случае  $\chi = 0$ , что указывает на пластичное течение в интервале низких значений скорости сдвига. Уменьшение

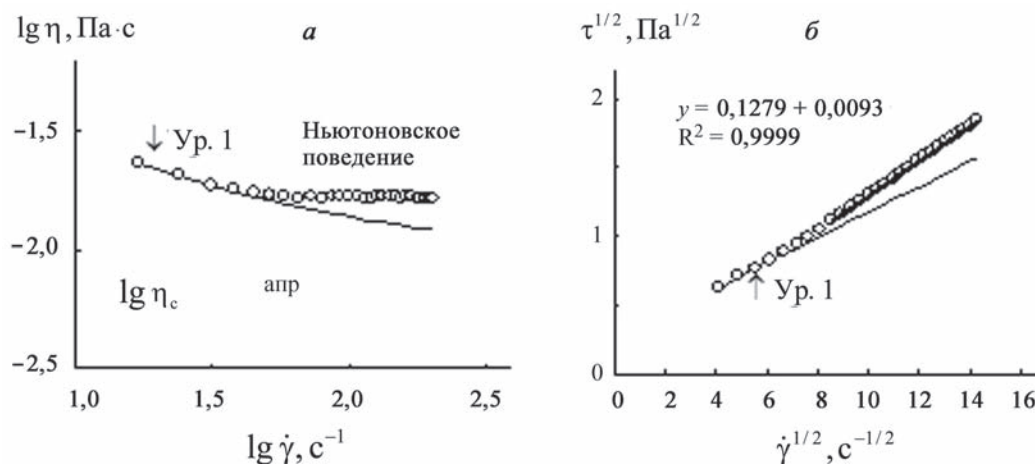


Рис. 1. Реологическое поведение жидкого парафина при 40 °С: *a* – кривая вязкости в двойных логарифмических координатах, *б* – кривая течения в корневых координатах (экспериментальные данные из работы [4])

вязкости с ростом скорости сдвига объясняется постепенным разрушением ассоциатов молекул парафина под действием разрывающих гидродинамических сил.

#### Неполярные жидкости: силиконовое масло и масло FC70

В работе [5] исследовано стационарное течение различных наножидкостей на основе двух неполярных жидкостей: силиконовое масло (кинематическая вязкость 50 сСт, плотность 0,96); масло FC70 (3M<sup>TM</sup> Fluorinert, кинематическая вязкость 12 сСт, плотность 1,94). Вязкость определена с помощью реометра с контролируемой скоростью сдвига («Bohlin CVO») при температуре 25 °С. Экспериментальные данные для исходного силиконового масла представлены на рис. 2, *a* и в табл. 3.

Очевидно, что значение «ньютоновской» вязкости  $\eta_N$  при высокой скорости много выше предельной вязкости  $\eta_c$ . В рамках структурной модели это означает, что в жидком парафине сохраняется некоторая структура, состоящая из ассоциатов молекул парафина, которая в среднем не изменяется даже при высоких скоростях сдвига.

Согласно графику (рис. 2), в интервале низких значений скорости сдвига применима аппроксимация уравнением (1). В интервале высоких значений скорости сдвига можно достаточно уверенно говорить о ньютоновском поведении силиконового масла ( $\eta_N \approx \text{const}$ ).

Однако на участке средних значений скорости сначала происходит значительное снижение вязко-

сти, при котором напряжение сдвига практически постоянно (что отмечено жирной стрелкой). Затем наблюдается участок снижения вязкости, который можно аппроксимировать уравнением (2):

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

В рамках структурной реологической модели [3] коэффициенты этого реологического уравнения имеют следующий вид:

$$\eta_{cv}^{1/2} = \eta_{\infty}^{1/2} + B\tilde{N}\tilde{k}_3 / (\tilde{k}_3 + \tilde{k}_1), \quad (3)$$

$$\tau_{cv}^{1/2} = B\tilde{N} / (\tilde{k}_2 - \tilde{k}_0) / (\tilde{k}_3 + \tilde{k}_1). \quad (4)$$

Здесь  $\tilde{N}$  равно числу частиц в единице объема. Уравнения содержат следующие коэффициенты:  $\tilde{k}_2$  – константа скорости формирования агрегатов при случайных столкновениях частиц,  $\tilde{k}_0$  – константа скорости спонтанного разрушения агрегатов, например, в результате теплового движения,  $\tilde{k}_1$  – константа скорости разрушения агрегата под действием растягивающих гидродинамических сил,  $\tilde{k}_3$  – константа скорости формирования агрегатов частиц из одиночных частиц под действием сдвига. Коэффициент  $B$  не зависит от скорости сдвига.

Коэффициент  $\tau_{cv}^{1/2}$  является положительным, если  $\tilde{k}_0 < \tilde{k}_2$ , и отрицательным, если  $\tilde{k}_0 > \tilde{k}_2$ . Поэтому в данном интервале значений скорости возможны три вида реологического поведения. В первом случае ( $\tilde{k}_0 < \tilde{k}_2$ ) вязкость уменьшается с ростом скорости сдвига, причем коэффициент  $\tau_{cv}^{1/2}$  меньше или сравним по величине с коэффициентом  $\eta_{cv}^{1/2}$ . Во втором случае ( $\tilde{k}_0 > \tilde{k}_2$ ) вязкость

Т а б л и ц а 1

**Зависимость вязкости от скорости сдвига жидкого парафина при 40 °С**

$\lg \dot{\gamma}, \text{c}^{-1}$	1,227	1,382	1,497	1,583	1,654	1,716	1,770
$\lg \eta, \text{Па с}$	-1,631	-1,689	-1,735	-1,751	-1,761	-1,769	-1,775
$\lg \dot{\gamma}, \text{c}^{-1}$	1,820	1,865	1,904	1,942	1,973	2,004	2,034
$\lg \eta, \text{Па с}$	-1,782	-1,780	-1,782	-1,780	-1,780	-1,780	-1,780
$\lg \dot{\gamma}, \text{c}^{-1}$	2,061	2,086	2,111	2,131	2,156	2,176	2,196
$\lg \eta, \text{Па с}$	-1,782	-1,782	-1,780	-1,780	-1,780	-1,780	-1,782
$\lg \dot{\gamma}, \text{c}^{-1}$	2,215	2,233	2,250	2,268	2,283	2,298	2,313
$\lg \eta, \text{Па с}$	-1,780	-1,780	-1,782	-1,782	-1,782	-1,784	-1,784

Т а б л и ц а 2

**Реологические характеристики молекулярных жидкостей: коэффициенты реологических уравнений 1 и 2, значения «ньютоновской» вязкости (система СИ)**

Жидкость	$\tau_c^{1/2}$	$\eta_c^{1/2}$	$\chi$	$\eta_v^{1/2}$	$\tau_{cv}^{1/2}$	$\eta_N$
Жидкий парафин	0,246	0,093	0	–	–	~0,0164
Силиконовое масло	0,150	0,068	0,139	0,114	0,073	~0,0275
Масло FC70	0,095	0,030	0	0,115	0,010	~0,0153

Т а б л и ц а 3

**Зависимость вязкости от скорости сдвига силиконового масла при 25 °С**

$\lg \dot{\gamma}, \text{c}^{-1}$	-0,940	-0,865	-0,778	-0,698	-0,615	-0,532	-0,452	-0,373
$\lg \eta, \text{Па с}$	-0,841	-0,872	-0,933	-0,990	-1,021	-1,087	-1,128	-1,179
$\lg \dot{\gamma}, \text{c}^{-1}$	-0,290	-0,206	-0,127	-0,024	0,032	0,091	0,171	0,254
$\lg \eta, \text{Па с}$	-1,251	-1,349	-1,410	-1,441	-1,467	-1,487	-1,523	-1,544
$\lg \dot{\gamma}, \text{c}^{-1}$	0,373	0,456	0,532	0,615	0,698	0,778	0,857	0,941
$\lg \eta, \text{Па с}$	-1,554	-1,545	-1,544	-1,544	-1,544	-1,554	-1,554	-1,554

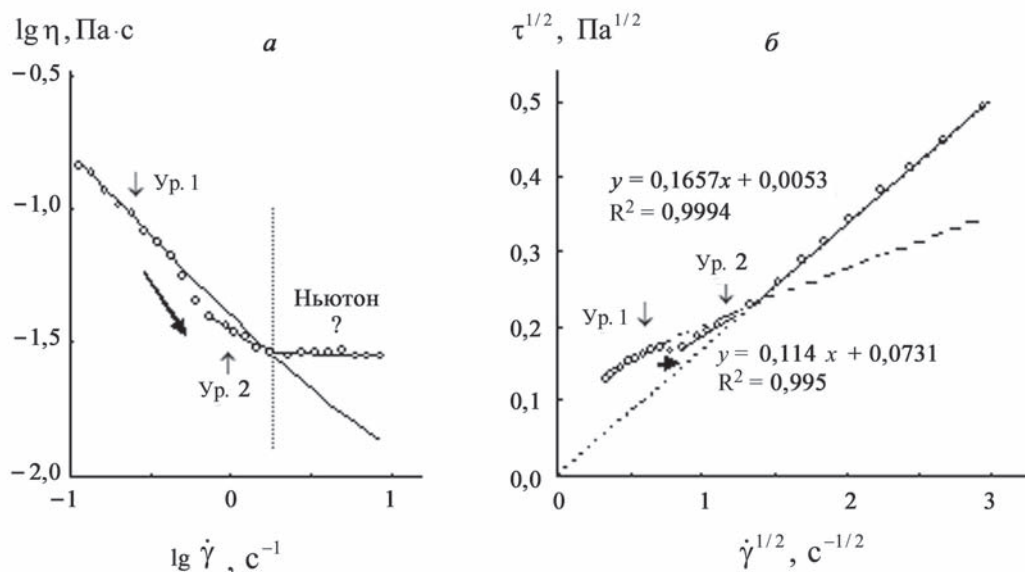


Рис. 2. Реологическое поведение силиконового масла при 25 °С: *a* – кривая вязкости в двойных логарифмических координатах, *б* – кривая течения в корневых координатах (экспериментальные данные из работы [5])

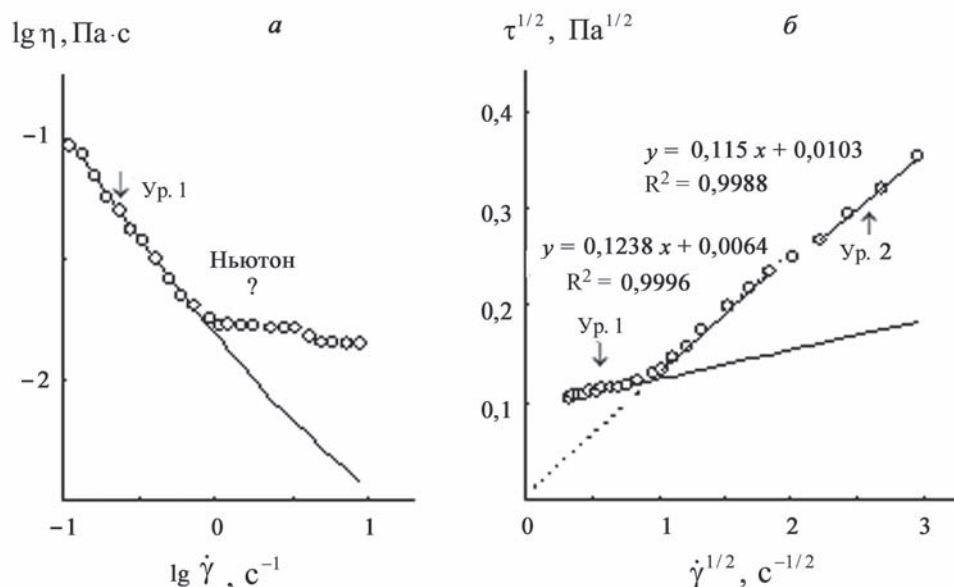


Рис. 3. Реологическое поведение масла FC70 при 25 °С: *a* – кривая вязкости в двойных логарифмических координатах, *б* – кривая течения в корневых координатах (экспериментальные данные из работы [5])

увеличивается с ростом скорости сдвига (явление сдвигового затвердевания). 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  $\eta_{cv} = \eta_N$ .

Поскольку приближенное значение  $\eta_N$  намного больше  $\eta_c$ , то жидкость является структури-

рованной; реологическое поведение при высоких значениях скорости относится к третьему случаю ( $\tilde{k}_0 \approx \tilde{k}_2$ ). В области средних значений скорости происходит скачок, связанный с изменением структуры вещества, а затем происходит снижение вязкости со скоростью, описанное уравнением (2).

Экспериментальные данные для исходного масла FC70 показаны на рис. 3, *a* и представлены

Т а б л и ц а 4

**Зависимость вязкости от скорости сдвига масла FC70 при 25 °С**

$\lg \dot{\gamma}, \text{c}^{-1}$	-0,936	-0,865	-0,781	-0,697	-0,618	-0,538	-0,458	-0,378
$\lg \eta, \text{Па с}$	-1,032	-1,074	-1,158	-1,247	-1,300	-1,384	-1,432	-1,505
$\lg \dot{\gamma}, \text{c}^{-1}$	-0,299	-0,215	-0,131	-0,032	-0,028	0,092	0,171	0,251
$\lg \eta, \text{Па с}$	-1,584	-1,658	-1,695	-1,747	-1,779	-1,768	-1,779	-1,779
$\lg \dot{\gamma}, \text{c}^{-1}$	0,375	0,458	0,530	0,614	0,697	0,777	0,861	0,944
$\lg \eta, \text{Па с}$	-1,789	-1,789	-1,789	-1,821	-1,821	-1,842	-1,853	-1,853

в табл. 4. Согласно графику (рис. 3), в интервале низких значений скорости применима аппроксимация уравнением (1). В интервале средних значений скорости достаточно уверенно можно говорить о ньютоновском поведении масла FC70 ( $\eta_N \approx \text{const}$ ). В небольшом интервале высоких значений скорости сдвига можно предложить аппроксимацию уравнением (2).

Таким образом, при достаточно низких значениях скорости сдвига рассмотренные жидкости имеют структуру, которая постепенно разрушается по мере увеличения скорости сдвига ( $\tilde{k}_1 > 0, \tilde{k}_3 = 0$ ). В области высоких значений скорости сдвига возникает состояние, при котором возникают новые ассоциаты молекул за счет столкновений при сдвиге ( $\tilde{k}_3 > 0, \tilde{k}_1 > 0$ ), но в целом преобладает процесс разрушения структуры ( $\tilde{k}_0 < \tilde{k}_2$ ). В случае, когда  $\tilde{k}_0 \approx \tilde{k}_2$ , наблюдается состояние, сходное с «ньютоновским» течением, где вязкость  $\eta_N$  примерно постоянна.

Важно отметить, что рассмотренные жидкости не относятся к высокомолекулярным поли-

мерным соединениям и демонстрируют участок сдвигового разжижения только при низкой скорости сдвига. В отличие от обычных растворов или расплавов полимеров кривые вязкости таких низкомолекулярных систем имеют достаточно большой участок «ньютоновского» течения при высокой скорости сдвига.

### Заключение

Уравнения структурной реологической модели использованы для описания и объяснения «ньютоновского» поведения в интервалах высоких значений скорости сдвига в жидкостях, проявляющие также неньютоновские свойства. Показано, что реологическое поведение с практически постоянной вязкостью можно интерпретировать как достижение динамического равновесия с примерно постоянным числом молекул в ассоциатах при высоких значениях скорости сдвига. В таком состоянии жидкость имеет определенную структуру; достижение полностью разрушенной структуры кажется маловероятным даже при очень высокой скорости сдвига.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Barnes H.A. A Handbook of Elementary Rheology. Institute of Non-Newtonian Fluid Mechanics, University of Wales, Aberystwyth. 2000.
2. Кирсанов Е.А., Матвеев В.Н. Неньютоновское течение дисперсных, полимерных и жидкокристаллических систем. Структурный подход. М., 2016. 384 с. [Kirsanov E.A., Matveenko V.N. Non-Newtonian flow of dispersed, polymer and liquid crystal systems. Structural approach. Moscow, 2016, 384 p. (in Russ.)].
3. Кирсанов Е.А., Матвеев В.Н. Вязкость и упругость структурированных жидкостей. М., 2022, 284 с. [Kirsanov E.A., Matveenko V.N. Viscosity and elasticity of structured liquids. Moscow, 2022, 284 p. (in Russ.)].
4. Rouhollah Yadollahi Farsani, Afrsiab Rais, Afshin Ahmadi Nadooshan, Amin Shahsavari Investigation with rheological behavior of liquid paraffin / Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanofluid: Experimental approach // Energy Equip. Sys./ Vol. 7 / No. 2 / June 2019 / 149–158

5. Libor Z., Wilson S.A., Zhang Q. Rheological properties of magnetic and electro-active nanoparticles in non-polar liquids // J. Materials Science 2011 Vol. 46. N 16. P. 5385.

### **Информация об авторах**

Матвеевко Владимир Николаевич – профессор кафедры коллоидной химии МГУ имени М.В. Ломоносова, докт. хим. наук (13121946VNM@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-6142-5710>);

Кирсанов Евгений Александрович – доцент Московского государственного областного социально-гуманитарного института, ул. Зелёная, д. 30, 140411 Коломна, Московская область, Россия, канд. физ.-матем. наук (kirsanov47@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3030-7989>).

### **Вклад авторов**

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

### **Конфликт интересов**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 04.04.2023;  
одобрена после рецензирования 12.04.2023;  
принята к публикации 12.05.2023.