

DOI: 10.15593/2224-9400/2021.3.02

УДК 543.544.5.068.7

**Я.А. Климова, Л.Д. Аснин**Пермский национальный исследовательский  
политехнический университет, Пермь, Россия**КОЭФФИЦИЕНТЫ ДИФФУЗИИ ЛЕЙЦИЛ-ГЛИЦИНА  
И ГЛИЦИЛ-ЛЕЙЦИНА В ВОДНО-МЕТАНОЛЬНЫХ  
РАСТВОРАХ**

*Методом Тейлора–Эйриса измерены коэффициенты диффузии ( $D_m$ ) дипептидов Gly-Leu и Leu-Gly в водно-метанольных растворах с содержанием метанола 10 и 80 % об., модифицированных небольшой добавкой ( $2 \cdot 10^{-4}$  М) ацетата аммония. Установлено, что для исследованных дипептидов, отличающихся последовательностью соединения остатков глицина и лейцина, коэффициенты диффузии совпадают в пределах погрешности эксперимента. Увеличение содержания метанола в растворе приводит к уменьшению значения  $D_m$ , свидетельствуя об увеличении гидродинамического радиуса диффундирующей частицы в растворах с высоким содержанием метанола. При этом на основании сравнения экспериментальных значений гидродинамического радиуса с теоретически рассчитанным размером молекул делается вывод о нестабильности сольватной оболочки. Рассматривается вопрос о возможности применения для предсказания значений  $D_m$  дипептидов популярных эмпирических корреляционных уравнений: Вильке–Ченга, Шайбеля, Редди–Дорэсвейми, Лусиса–Ратклифа и Гайдука–Лоди. Лучшие результаты показывало уравнение Гайдука–Лоди, но даже в этом случае погрешность могла достигать 10 %. Остальные рассмотренные уравнения не могут быть использованы для предсказания коэффициентов диффузии дипептидов с приемлемой точностью.*

**Ключевые слова:** коэффициент диффузии, дипептиды, хроматография, корреляция.

**Y.A. Klimova, L.D. Asnin**

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

**DIFFUSION COEFFICIENTS OF LEUCIL-GLYCINE  
AND GLYCYL-LEUCINE IN WATER-METHANOL SOLUTIONS**

*The diffusion coefficients ( $D_m$ ) of the dipeptides Gly-Leu and Leu-Gly in water-methanol solutions with a methanol content of 10 and 80 vol.%, modified with a small addition ( $2 \cdot 10^{-4}$  M) of ammonium acetate were measured by the Taylor-Aris method. It was found that for the studied dipeptides which differ in the sequence of the residues of glycine and leucine the diffusion coefficients coincide within the experimental error. An increase in*

*the methanol content in the solution leads to a decrease in the  $D_m$  value, indicating an increase in the hydrodynamic radius of the diffusing particle in solutions with a high methanol content. In this case, on the basis of a comparison of the experimental values of the hydrodynamic radius with the theoretically calculated size of the molecules, it is concluded that the solvation shell is unstable. The possibility of using the popular empirical correlations of Wilke-Chang, Scheibel, Reddy-Doraiswamy, Lysis-Ratcliff, and Hayduk-Laudie for predicting  $D_m$  values of dipeptides is discussed. The best results were shown by the Hayduk-Laudie equation, but even in this case the error could reach 10%. The rest of the considered equations cannot be used to predict the diffusion coefficients of dipeptides with acceptable accuracy.*

**Keywords:** *diffusion coefficient, dipeptides, chromatography, correlation.*

Коэффициент молекулярной диффузии ( $D_m$ ) является важным параметром в химической технологии, так как влияет на скорость процессов массопереноса во многих типах реакторов. По этой причине знание величины  $D_m$  требуется во многих инженерных расчетах. Существует обширная литература, в которой подробно рассматриваются теоретические и экспериментальные аспекты изучения диффузии в жидких системах [1–4]. Считается, что оптические методы, основанные на явлениях интерференции и светорассеяния [5, 6], и метод эхоспиновой спектроскопии [7] обеспечивают определение  $D_m$  с высокой точностью, однако требуют наличия специального, дорогостоящего оборудования. В хроматографии широкое распространение получил динамический метод Тейлора–Эйриса [8, 9], основанный на измерении размывания пика исследуемого вещества в длинном узком капилляре, который может быть реализован на стандартных хроматографах, имеющих в распоряжении многих лабораторий. Последний метод применялся для определения коэффициентов диффузии как в газах [10], так и в жидкостях [11–14].

Экспериментальное определение  $D_m$  является длительным и трудоемким процессом, поэтому многие исследователи предпочитают оценивать коэффициент молекулярной диффузии по эмпирическим уравнениям, которые связывают данную величину с другими физико-химическими свойствами диффундирующего вещества и растворителя. Точность предсказания значений  $D_m$  таким способом заранее неизвестна и должна оцениваться для каждого класса веществ экспериментально. С этой целью в представленной работе изучается возможность определения коэффициентов диффузии дипептидов в водно-метанольных смесях с помощью эмпирических корреляций на примере двух представителей этой группы соединений: Gly-Leu и Leu-Gly. Для этого ме-

тодом Тейлора–Эйриса были измерены коэффициенты диффузии указанных дипептидов, которые сравнивались с результатами расчетов  $D_m$  по пяти наиболее известным эмпирическим уравнениям. Выбор модельных объектов обусловлен нашим интересом к проблеме массопереноса дипептидов в хроматографических колонках [15].

**Теоретическая часть.** Для оценки  $D_m$  (см<sup>2</sup>/с) использовались следующие эмпирические уравнения, позволяющие предсказывать коэффициенты диффузии в бесконечно разбавленных растворах диффундирующих веществ.

*Корреляция Вильке–Ченга* [16] наиболее широко применяется для расчета  $D_m$ . Данный метод является эмпирической модификацией уравнения Стокса–Эйнштейна и, как указывают его авторы, обеспечивает оценку коэффициента диффузии со средней погрешностью 10 %:

$$D_m = 7,4 \cdot 10^{-8} \frac{\sqrt{\psi_B M_B T}}{\eta_B V_A^{0.6}}, \quad (1)$$

где  $M_B$  – молекулярная масса растворителя  $B$ , г/моль;  $\eta_B$  – вязкость растворителя, сП;  $T$  – температура, К;  $\psi_B$  – фактор ассоциации, который учитывает взаимодействие растворитель–растворитель (значения  $\psi_B$  для метилового спирта – 1.9, для воды – 2.6);  $V_A$  – мольный объем растворенного вещества  $A$  в нормальной точке кипения, см<sup>3</sup>/моль.

*Корреляция Шайбеля* [17]. Шайбель модифицировал уравнение Вильке–Ченга и исключил из него фактор ассоциации:

$$D_m = \frac{8,2 \cdot 10^{-8} T}{\eta_B V_A^{1/3}} \left[ 1 + \left( \frac{3V_B}{V_A} \right)^{2/3} \right], \quad (2)$$

где  $V_B$  – мольный объем растворителя, см<sup>3</sup>/моль.

*Корреляция Редди–Дорэсвейми* [18]. Этот метод расчета также позволяет не рассчитывать фактор ассоциации:

$$D_m = \frac{K' \sqrt{M_B T}}{\eta_B (V_A V_B)^{1/3}}, \quad (3)$$

где

$$K' = 10 \cdot 10^{-8}, \text{ если } \frac{V_A}{V_B} \leq 1,5,$$

$$K' = 8,5 \cdot 10^{-8}, \text{ если } \frac{V_A}{V_B} \geq 1,5.$$

Средняя погрешность расчета по данной корреляции, оцененная по результатам анализа 96 бинарных систем, составляет менее 20 % [18].

*Корреляция Лусиса–Ратклифа* [19]:

$$D_m = \frac{8,52 \cdot 10^{-8} T}{\eta_B V_B^{1/3}} \left[ 1,40 \left( \frac{V_B}{V_A} \right)^{1/3} + \frac{V_B}{V_A} \right]. \quad (4)$$

*Корреляция Гайдука–Лоди* [20]. Данная корреляция, основанная на уравнении Отмера и Такара [21], была разработана для расчета коэффициентов диффузии растворов неэлектролитов в воде:

$$D_m = 13,26 \cdot 10^{-5} \eta_B^{-1,4} V_A^{-0,589}.$$

В жидкостной хроматографии обычно используются смешанные растворители. Коэффициенты диффузии в таких системах рассчитывают с использованием средневзвешенных значений молекулярной массы, фактора ассоциации и молярного объема смеси [9]:

$$M_B = \sum_{i=1}^N x_i M_i, \quad (5)$$

$$\Psi_B = \sum_{i=1}^N x_i \Psi_i, \quad (6)$$

$$V_B = \sum_{i=1}^N x_i V_i, \quad (7)$$

где  $N$  – количество компонентов растворителя;  $x_i$ ,  $M_i$ ,  $V_i$  – мольная доля, молекулярная масса и мольный объем  $i$ -го компонента смеси, соответственно.

В расчетах по перечисленным эмпирическим уравнениям использовали величины  $V_A$  исследованных дипептидов, найденные методом Шредера [4]. Значения вязкости смешанных растворителей брали из работы [22].

**Экспериментальная часть.** В работе использовали Gly-Leu фирмы MP Biomedicals (Франция), Leu-Gly фирмы Sigma-Aldrich (Германия). Подвижные фазы готовили из метанола квалификации «х.ч.» (Вектон, Россия), деионизованной воды, очищенной с помощью системы Millipore Synergy (Франция) и ацетата аммония аналитической чис-

тоты (Acros Organics, Бельгия). Эксперименты выполнялись на хроматографе LC-20ADXR (Shimadzu, Япония) с диодно-матричным детектором, оснащенным термостатом колонок, куда помещался свернутый в кольцо измерительный капилляр из полиэфирэфиркетона (IDEX Health & Science, США) длиной 1565 см и внутренним радиусом  $R_{cap} = 0,02525$  см.

Коэффициенты молекулярной диффузии дипептидов определяли в смесях метанол–вода с содержанием метанола 10 и 80 % об., модифицированных ацетатом аммония ( $2 \cdot 10^{-4}$  М). (Необходимость небольшой добавки соли обусловлена тем, что такие модифицированные подвижные фазы используются в исследованиях массопереноса дипептидов в хроматографических колонках [15].) Образец вводили в измерительный капилляр и записывали сигнал детектора на выходе из капилляра на длине волны 220 нм. Определив первый ( $\mu_1$ ) и второй центральный ( $\mu'_2$ ) моменты выходящего пика, можно рассчитать коэффициент диффузии по уравнению [9, 12]

$$D_m = \frac{1}{24} \frac{\mu_1}{\mu'_2} R_{cap}. \quad (8)$$

Моменты пика определяли численным интегрированием методом трапеций. Значения  $\mu_1$  и  $\mu'_2$  корректировали на вклады от внеколоночного объема, определенные в системе без капилляра. Эксперименты выполняли при температуре 25 °С со скоростью потока подвижной фазы 0,1 мл/мин. Объем проб составлял 4 мкл с концентрацией Leu-Gly или Gly-Leu 1 мг/мл. Каждое измерение повторяли три раза.

Гидродинамический радиус молекул ( $r$ ) рассчитывали по уравнению Стокса–Эйнштейна, используя экспериментальные значения коэффициентов диффузии:

$$r = \frac{k_B T}{6\pi\eta_B D_m}, \quad (9)$$

где  $k_B$  – постоянная Больцмана. Также для сравнения с экспериментальными значениями радиус молекул был рассчитан с использованием программного обеспечения Chem3D 15.1 (Perkin Elmer, США) путем оптимизации геометрии молекулы методом молекулярной механики с использованием силового поля MM2.

**Результаты и их обсуждение.** В табл. 1 представлены значения коэффициентов молекулярной диффузии Gly-Leu и Leu-Gly, получен-

ные экспериментально и рассчитанные по известным эмпирическим уравнениям. При выполнении эмпирических расчетов не учитывали наличие в растворителе добавки ацетата аммония, так как его концентрация пренебрежимо мала.

Таблица 1

Коэффициенты молекулярной диффузии (см<sup>2</sup>/с) Leu-Gly и Gly-Leu

Растворитель	$D_m$	$D_m$ , рассчитанный по уравнению				
		Вильке-Ченга	Шайбеля	Редди-Дорэсвейми	Лусиса-Ратклифа	Гайдука-Лоди
<b>Gly-Leu</b>						
MeOH-H <sub>2</sub> O (10:90)	5,41·10 <sup>-6</sup>	5,49·10 <sup>-6</sup>	5,21·10 <sup>-6</sup>	7,27·10 <sup>-6</sup>	6,12·10 <sup>-6</sup>	4,86·10 <sup>-6</sup>
MeOH-H <sub>2</sub> O (80:20)	4,98·10 <sup>-6</sup>	6,11·10 <sup>-6</sup>	5,92·10 <sup>-6</sup>	7,40·10 <sup>-6</sup>	6,52·10 <sup>-6</sup>	4,94·10 <sup>-6</sup>
<b>Leu-Gly</b>						
MeOH-H <sub>2</sub> O (10:90)	5,32·10 <sup>-6</sup>	5,49·10 <sup>-6</sup>	5,21·10 <sup>-6</sup>	7,27·10 <sup>-6</sup>	6,12·10 <sup>-6</sup>	4,86·10 <sup>-6</sup>
MeOH-H <sub>2</sub> O (80:20)	5,03·10 <sup>-6</sup>	6,11·10 <sup>-6</sup>	5,92·10 <sup>-6</sup>	7,40·10 <sup>-6</sup>	6,52·10 <sup>-6</sup>	4,94·10 <sup>-6</sup>

Коэффициенты молекулярной диффузии Gly-Leu и Leu-Gly отличаются друг от друга не более чем на 2 %, при этом значения  $D_m$  в смеси MeOH-H<sub>2</sub>O (10:90) выше, чем в смеси MeOH-H<sub>2</sub>O (80:20) на заметно большую величину (6–9 %). В соответствии с уравнением Стокса–Эйнштейна с увеличением размера молекулы диффундируемого вещества его коэффициент диффузии уменьшается. Следовательно, гидродинамический радиус обоих дипептидов в смеси с содержанием метанола 80 об. % больше. Логично предположить, что исследуемые соединения лучше сольватируются молекулами метанола, что приводит к формированию сольватной оболочки большего размера.

В табл. 2 представлены гидродинамические радиусы молекул Gly-Leu и Leu-Gly, рассчитанные по уравнению Стокса–Эйнштейна с использованием экспериментально полученных значений  $D_m$ , а также молекулярные радиусы, полученные путем оптимизации геометрии молекул методом молекулярной механики.

Значения  $r$ , полученные по уравнению (9), меньше их значений, рассчитанных методом молекулярной механики, хотя и того же порядка величины. Логично предположить, что молекулы дипептидов в растворе окружены нестабильной сольватной оболочкой, иначе гидроди-

намический радиус был бы заметно больше молекулярного радиуса. Тем не менее стабильность сольватных оболочек в обогащенных метанолом смесях выше. На это указывает более высокое значение  $r$  в растворах, содержащих 80 % об. MeOH. По-видимому, это объясняется лучшей сольватацией метанолом гидрофобного остатка лейцина в молекуле дипептида.

Таблица 2

## Радиусы молекул Gly-Leu и Leu-Gly

Дипептид	Растворитель	Гидродинамический радиус, нм	Молекулярный радиус, нм
Gly-Leu	MeOH-H <sub>2</sub> O (10:90)	0,365	0,425
	MeOH-H <sub>2</sub> O (80:20)	0,400	
Leu-Gly	MeOH-H <sub>2</sub> O (10:90)	0,372	0,470
	MeOH-H <sub>2</sub> O (80:20)	0,398	

Для оценки правильности эмпирических уравнений были рассчитаны погрешности коэффициентов диффузии, полученных по соответствующим корреляциям (табл. 3). Полученные данные показывают, что наибольшую погрешность при расчете  $D_m$  дает корреляция Редди–Дорэсвейми (49 %). Корреляции Вильке–Ченга и Шайбеля обеспечивают более точную оценку, чем корреляция Лусиса–Ратклифа, однако в обоих случаях погрешность может превышать 15 %.

Таблица 3

Относительная погрешность (%) расчета  $D_m$   
по эмпирическим уравнениям

Дипептид	Растворитель	Значения, рассчитанные по уравнению				
		Вильке–Ченга	Шайбеля	Редди–Дорэсвейми	Лусиса–Ратклифа	Гайдука–Лоди
Gly-Leu	MeOH-H <sub>2</sub> O (10:90)	1,4	3,8	34,3	13,1	10,2
	MeOH-H <sub>2</sub> O (80:20)	22,7	18,8	48,7	30,9	0,9
Leu-Gly	MeOH-H <sub>2</sub> O (10:90)	3,1	2,2	36,5	16,0	8,7
	MeOH-H <sub>2</sub> O (80:20)	21,5	17,7	47,2	29,6	1,8

Для всех исследуемых смесей значения  $D_m$ , найденные методами Вильке–Ченга, Редди–Дорэсвейми и Лусиса–Ратклифа, были выше экспериментальных. Для всех рассмотренных корреляций за исключением корреляции Гайдука–Лоди характерно увеличение погрешности предсказания  $D_m$  в смесях с большим содержанием метанола. При этом последнее корреляционное уравнение показывало лучший результат, погрешность которого не превышала 10 %.

**Заключение.** Измерены коэффициенты молекулярной диффузии дипептидов Gly-Leu и Leu-Gly в водно-метанольных растворах методом Тейлора–Эйриса. Проведено сравнение экспериментально полученных значений  $D_m$  со значениями, рассчитанными по пяти наиболее распространенным эмпирическим уравнениям. Показано, что наиболее точной для данной пары дипептидов является корреляция Гайдука–Лоди (погрешность до 10 %). Сравнение экспериментальных значений гидродинамических радиусов молекул с их геометрическими размерами, найденными методом молекулярной механики, указывает на то, что в растворе дипептиды окружены нестабильной сольватной оболочкой, при этом толщина этой оболочки выше в смеси MeOH-H<sub>2</sub>O (80:20) для обоих дипептидов.

*Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 20-53-26007.*

### Список литературы

1. Johnson P.A., Babb A.L. Liquid diffusion of non-electrolytes // Chem. Rev. – 1956. – Vol. 56, no. 3. – P. 387–453.
2. Ghai R.K., Ertl H., Dullien F.A.L. Liquid diffusion of nonelectrolytes: Part I // AIChE J. – 1973. – Vol. 19, no. 5. – P. 881–900.
3. Ertl H., Ghai R.K., Dullien F.A.L. Liquid diffusion of nonelectrolytes: Part II // AIChE J. – 1974. – Vol. 20, no. 1. – P. 1–20.
4. Poling B.E., Prausnitz J.M., O’Connell J.P. Properties of gases and liquids. – New York: McGraw-Hill, 2001. – 803 p.
5. Krahn W., Schweiger G., Lucas K. Light scattering measurements of mutual diffusion coefficients in binary liquid mixtures // J. Phys. Chem. – 1983. – Vol. 87, no. 22. – P. 4515–4519.
6. Ambrosini D., Paoletti D., Rashidnia N. Overview of diffusion measurements by optical techniques // Opt. Lasers Eng. – 2008. – Vol. 46, no. 12. – P. 852–864.
7. Stejskal E.O., Tanner J.E. Spin diffusion measurements: spin echoes in the presence of a time-dependent field gradient // J. Chem. Phys. – 1965. – Vol. 42, no. 1. – P. 288–292.



8. Taylor G.I. Conditions under which dispersion of a solute in a stream of solvent can be used to measure molecular diffusion // *Proc. R. Soc. London, Ser. A.* – 1954. – Vol. 225, no. 1163. – P. 473–477.

9. Li J., Carr P.W. Accuracy of empirical correlations for estimating diffusion coefficients in aqueous organic mixtures // *Anal. Chem.* – 1997. – Vol. 69, no. 13. – P. 2530–2536.

10. Balenovic Z., Myers M.N., Giddings J.C. Binary diffusion in dense gases to 1360 atm by the chromatographic peak-broadening method // *J. Chem. Phys.* – 1970. – Vol. 52, no. 2. – P. 915–922.

11. Grushka E., Kikta Jr E.J. Extension of the chromatographic broadening method of measuring diffusion coefficients to liquid systems. I. Diffusion coefficients of some alkylbenzenes in chloroform // *J. Phys. Chem.* – 1974. – Vol. 78, no. 22. – P. 2297–2301.

12. Ouano A.C. Diffusion in liquid systems. I. A simple and fast method of measuring diffusion constants // *Ind. Eng. Chem. Fundam.* – 1972. – Vol. 11, no. 2. – P. 268–271.

13. Pratt K.C., Slater D.H., Wakeham W.A. A rapid method for the determination of diffusion coefficients of gases in liquids // *Chem. Eng. Sci.* – 1973. – Vol. 28, no. 10. – P. 1901–1903.

14. Extensive database of liquid phase diffusion coefficients of some frequently used test molecules in reversed-phase liquid chromatography and hydrophilic interaction liquid chromatography / H. Song, Y. Vanderheyden, E. Adams [et al.] // *J. Chromatogr. A.* – 2016. – Vol. 1455. – P. 102–112.

15. Klimova Y.A., Asnin L.D. Enantioselective adsorption dynamics of leucyl-leucine in a Chirobiotic R column // *J. Chromatogr. A.* – 2021. – Vol. 1635. – Art. 461771.

16. Wilke C.R., Chang P. Correlation of diffusion coefficients in dilute solutions // *AIChE J.* – 1955. – Vol. 1, no. 2. – P. 264–270.

17. Scheibel E.G. Correspondence. Liquid diffusivities. Viscosity of gases // *Ind. Eng. Chem.* – 1954. – Vol. 46, no. 9. – P. 2007–2008.

18. Reddy K.A., Doraiswamy L.K. Estimating liquid diffusivity // *Ind. Eng. Chem. Fundam.* – 1967. – Vol. 6, no. 1. – P. 77–79.

19. Lysis M.A., Ratcliff C.A. Diffusion in binary liquid mixtures at infinite dilution // *Can. J. Chem. Eng.* – 1968. – Vol. 46, no. 5. – P. 385–387.

20. Hayduk W., Laudie H. Prediction of diffusion coefficients for nonelectrolytes in dilute aqueous solutions // *AIChE J.* – 1974. – Vol. 20, no. 3. – P. 611–615.

21. Othmer D.F., Thakar M.S. Correlating diffusion coefficient in liquids // *J. Ind. Eng. Chem.* – 1953. – Vol. 45, no. 3. – P. 589–593.

22. Influence of pressure and temperature on the physico-chemical properties of mobile phase mixtures commonly used in high-performance liquid chromatography / J. Billen, K. Broeckhoven, A. Liekens [et al.] // *J. Chromatogr. A.* – 2008. – Vol. 1210. – P. 30–44.

## References

1. Johnson P. A., Babb A. L. Liquid diffusion of non-electrolytes. *Chem. Rev.*, 1956, vol. 56, no. 3, pp. 387–453.
2. Ghai R. K., Ertl H., Dullien F. A. L. Liquid diffusion of nonelectrolytes: Part I. *AIChE J.*, 1973, vol. 19, no. 5, pp. 881–900.
3. Ertl H., Ghai R. K., Dullien F. A. L. Liquid diffusion of nonelectrolytes: Part II. *AIChE J.*, 1974, vol. 20, no. 1, pp. 1–20.
4. Poling B. E., Prausnitz J. M., O'Connell J. P. Properties of gases and liquids. New York: McGraw-Hill, 2001, 803 p.
5. Krahn W., Schweiger G., Lucas K. Light scattering measurements of mutual diffusion coefficients in binary liquid mixtures. *J. Phys. Chem.*, 1983, vol. 87, no. 22, pp. 4515–4519.
6. Ambrosini D., Paoletti D., Rashidnia N. Overview of diffusion measurements by optical techniques. *Opt. Lasers Eng.*, 2008, vol. 46, no. 12, pp. 852–864.
7. Stejskal E. O., Tanner J. E. Spin diffusion measurements: spin echoes in the presence of a time-dependent field gradient. *J. Chem. Phys.*, 1965, vol. 42, no. 1, pp. 288–292.
8. Taylor G. I. Conditions under which dispersion of a solute in a stream of solvent can be used to measure molecular diffusion. *Proc. R. Soc. London, Ser. A.*, 1954, vol. 225, no. 1163, pp. 473–477.
9. Li J., Carr P. W. Accuracy of empirical correlations for estimating diffusion coefficients in aqueous organic mixtures. *Anal. Chem.*, 1997, vol. 69, no. 13, pp. 2530–2536.
10. Balenovic Z., Myers M. N., Giddings J. C. Binary diffusion in dense gases to 1360 atm by the chromatographic peak-broadening method. *J. Chem. Phys.*, 1970, vol. 52, no. 2, pp. 915–922.
11. Grushka E., Kikta Jr E. J. Extension of the chromatographic broadening method of measuring diffusion coefficients to liquid systems. I. Diffusion coefficients of some alkylbenzenes in chloroform. *J. Phys. Chem.*, 1974, vol. 78, no. 22, pp. 2297–2301.
12. Ouano A. C. Diffusion in liquid systems. I. A simple and fast method of measuring diffusion constants. *Ind. Eng. Chem. Fundam.*, 1972, vol. 11, no. 2, pp. 268–271.
13. Pratt K. C., Slater D. H., Wakeham W. A. A rapid method for the determination of diffusion coefficients of gases in liquids. *Chem. Eng. Sci.*, 1973, vol. 28, no. 10, pp. 1901–1903.
14. Song H. et al. Extensive database of liquid phase diffusion coefficients of some frequently used test molecules in reversed-phase liquid chromatography and hydrophilic interaction liquid chromatography. *J. Chromatogr. A.*, 2016, vol. 1455, pp. 102–112.

15. Klimova Y.A., Asnin L.D. Enantioselective adsorption dynamics of leucyl-leucine in a Chirobiotic R column. *J. Chromatogr. A.*, 2021, vol. 1635, art. 461771.
16. Wilke C.R., Chang P. Correlation of diffusion coefficients in dilute solutions. *AIChE J.*, 1955, vol. 1, no. 2, pp. 264–270.
17. Scheibel E.G. Correspondence. Liquid diffusivities. Viscosity of gases. *Ind. Eng. Chem.*, 1954, vol. 46, no. 9, pp. 2007–2008.
18. Reddy K. A., Doraiswamy L. K. Estimating liquid diffusivity. *Ind. Eng. Chem. Fundam.*, 1967, vol. 6, no. 1, pp. 77–79.
19. Lysis M.A., Ratcliff C.A. Diffusion in binary liquid mixtures at infinite dilution. *Can. J. Chem. Eng.*, 1968, vol. 46, no. 5, pp. 385–387.
20. Hayduk W., Laudie H. Prediction of diffusion coefficients for nonelectrolytes in dilute aqueous solutions. *AIChE J.*, 1974, vol. 20, no. 3, pp. 611–615.
21. Othmer D.F., Thakar M.S. Correlating diffusion coefficient in liquids. *J. Ind. Eng. Chem.*, 1953, vol. 45, no. 3, pp. 589–593.
22. Billen, J., Broeckhoven, K., Liekens, A. et al. Influence of pressure and temperature on the physico-chemical properties of mobile phase mixtures commonly used in high-performance liquid chromatography. *J. Chromatogr. A.*, 2008, vol. 1210, pp. 30–44.

Получено 28.05.2021

### Об авторах

**Климова Яна Анатольевна** (Пермь, Россия) – аспирант кафедры «Химия и биотехнология» Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29; e-mail: yana-klimova-1995@mail.ru).

**Аснин Леонид Давыдович** (Пермь, Россия) – кандидат химических наук, доцент кафедры «Химия и биотехнология» Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29; e-mail: asninld@mail.ru).

### About the authors

**Yana A. Klimova** (Perm, Russian Federation) – Postgraduate student of Department of Chemistry and Biotechnology, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, e-mail: yana-klimova-1995@mail.ru).

**Leonid D. Asnin** (Perm, Russian Federation) – Ph.D. in Chemical Sciences, Associate Professor, Department of Chemistry and Biotechnology, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, e-mail: asninld@mail.ru).