

Оригинальная статья

УДК 539.21

DOI: 10.57070/2304-4497-2021-1(51)-35-42

КЛАСТЕРИЗАЦИЯ В ЖИДКОСТЯХ: ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ, МОДЕЛИ И ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ

© 2025 г. Н. М. Игнатенко, А. А. Солдатов, Н. Ю. Ершов, Л. П. Петрова

Юго-Западный государственный университет (Россия, 305040, Курск, ул. 50 лет Октября, 94)

Аннотация. Приведены результаты литературно-аналитического обзора работ, связанных с процессом кластеризации в жидкостях (образования устойчивых групп молекул (кластеров) под воздействием межмолекулярных сил). Рассматриваемые жидкости можно назвать наноструктурированными. Кластерная модель играет важную роль в описании физических и микроструктурных свойств жидкостей, в том числе теплоемкости, вязкости и сжимаемости. Кластеры могут значительно влиять на процессы в жидкостях, особенно вблизи критических точек. Рассмотрены теоретические аспекты кластерной модели, методы ее исследования и практическое применение в различных областях науки и техники. Одним из ключевых направлений исследований является изучение влияния внешних факторов (электрические и магнитные поля, температура, давление и другие) на формирование и развитие кластеров в жидкостях. Эти воздействия существенно изменяют их структуру, размеры и временные характеристики. Исследования показали, что переменные электрические поля могут вызывать динамические колебания плотности кластеров, что оказывает влияние на их оптические и диэлектрические свойства. Результаты подобных экспериментов открывают широкие перспективы для создания жидкостей с регулируемыми характеристиками (электропроводящие или магнитные жидкости). Эти материалы находят применение в устройствах новой генерации, например, в умных системах управления или адаптивной оптике.

Ключевые слова: кластеризация в жидкостях, кластерная модель, кластеры, давление, температура, кристаллы, электрические поля, магнитные поля

Для цитирования: Игнатенко Н.М., Солдатов А.А., Ершов Н.Ю., Петрова Л.П. Кластеризация в жидкостях: теоретические основы, модели и практическое применение. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2025;1(51):35–42. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-1\(51\)-35-42](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-1(51)-35-42)

Original article

CLUSTERING IN LIQUIDS: THEORETICAL FOUNDATIONS, MODELS AND PRACTICAL APPLICATION

© 2025 N. M. Ignatenko, A. A. Soldatov, N. Yu. Ershov, L. P. Petrova

Southwest State University (94 50 let Oktyabrya Str., Kursk, 305040, Russian Federation)

Abstract. The results of a literary and analytical review of works related to the clustering process in liquids (formation of stable groups of molecules (clusters)) are presented, under the influence of intermolecular forces). The liquids under consideration can be called nanostructured. The cluster model plays an important role in describing the physical and microstructural properties of liquids, including heat capacity, viscosity, and compressibility. Clusters can significantly affect processes in liquids, especially near critical points. The theoretical aspects of the cluster model, its research methods and practical application in various fields of science and technology are considered. One of the key areas of research is to study the influence of external factors (electric and magnetic fields, temperature, pressure, and others) on the formation and development of clusters in liquids. These impacts significantly change their structure, size, and time characteristics. Studies have shown that alternating electric fields can cause dynamic fluctuations in cluster density, which affects their optical and dielectric properties. The results of such experiments open up broad prospects for creating liquids with controlled characteristics (electrically

conductive or magnetic liquids). These materials are used in new generation devices, for example, in smart control systems or adaptive optics.

Keywords: clustering in liquids, cluster model, clusters, pressure, temperature, crystals, electric fields, magnetic fields

For citation: Ignatenko N.M., Soldatov A.A., Ershov N. Yu., Petrova L.P. Clusterization in liquids: theoretical foundations, models and practical application. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2025;1(51):35–42. (In Russ.). [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-1\(51\)-35-42](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-1(51)-35-42)

Введение

История исследования кластеров в жидкостях восходит к концу XIX в., когда ученые впервые начали изучать агрегационные процессы в конденсированных средах. В 1939 г. И. Френкель предложил дырочную теорию жидкостей, которая стала основой для современных представлений о кластеризации. С развитием рентгеноструктурного анализа и нейтронографии стало возможным экспериментально подтвердить наличие кластеров в жидкостях. В 1950-х гг. Дж. Бернал заложил основы компьютерного моделирования кластерных систем с использованием модели стальных сфер.

Основой теоретической модели является функция распределения количества частиц в кластерах. Важной характеристикой кластера является средний его размер, который определяется количеством Z .

Распределение кластеров по количеству частиц описывается функцией плотности, имеющей вид Эрлангового распределения:

$$f(Z) = \frac{\lambda^m Z^{m-1} e^{-\lambda Z}}{(m-1)!}, \quad (1)$$

где $Z > 0$; λ – масштабный параметр, который зависит от плотности жидкости и характеризует интенсивность процесса; m – порядок распределения, определяющий форму и параметры функции; Z – количество частиц в кластере.

Среднее количество частиц в кластере \bar{Z} вычисляется по формуле:

$$\bar{Z} = \frac{m}{\lambda}, \quad (2)$$

где λ может быть определено как отношение плотности жидкости к ее критической плотности:

$$\lambda = \frac{\rho_{кр}}{\rho}, \quad (3)$$

Наиболее вероятное число частиц Z_{mode} в кластере вычисляется по формуле [1]:

$$Z_{mode} = \frac{m-1}{\lambda}. \quad (4)$$

В работе [2] рассматривается распределение кластеров в простых и органических жидкостях. Для примера расчета возьмем криптон при температуре $T = 117$ К и плотности $\rho = 2442$ кг/м³, критическое значение плотности $\rho_{кр} = 911$ кг/м³:

$$\lambda = \frac{911}{2442} = 0,373. \quad (5)$$

Подставляя полученное значение в уравнение для величин \bar{Z} и Z_{mode} , получим:

$$\bar{Z} = \frac{4}{0,373} \approx 10,72 \quad Z_{mode} = \frac{3}{0,373} \approx 8,04$$

Таким образом, среднее число частиц в кластере составляет 10,72, а наиболее вероятное 8,04.

В табл. 1 приведены результаты расчетов величин \bar{Z} и Z_{mode} для различных типов жидкостей.

Вклад кластеров в уравнение состояния жидкости можно выразить через изотермическую сжимаемость β_T [3]. Этот параметр характеризует изменение объема жидкости при изменении давления при постоянной температуре. Его расчет может быть представлен следующим уравнением:

$$\beta_T = \alpha \rho \left(\frac{RT}{M} \right) + B, \quad (6)$$

где α – коэффициент, отражающий степень ассоциации молекул в кластере и определяющий их склонность объединяться в стабильные группы; R – универсальная газовая постоянная; M – молярная масса вещества; B – эмпирическая или теоретическая добавки, учитывающие дополнительные взаимодействия между молекулами; ρ – плотность жидкости; T – абсолютная температура.

Это уравнение позволяет описывать макроскопические свойства жидкостей с учетом образования кластеров и является важным инструментом для

Результаты расчетов величин \bar{Z} и Z_{mode} для различных типов жидкостейTable 1. Calculation results \bar{Z} и Z_{mode} for different types of liquids

Жидкость	T, K	$\rho_{кр}, \text{кг/м}^3$	\bar{Z}	Z_{mode}	Z_1
Аргон	85	1407	10,5	7,9	8,9
Неон	25	1240	10,3	7,7	8,5
Криптон	117	2442	10,7	8,1	8,5

П р и м е ч а н и е: Z_1 – это среднее число ближайших соседей у входящих в состав кластера частиц.

прогнозирования фазовых переходов и других явлений в жидкостях.

Ключевую роль в исследовании кластерных систем играют экспериментальные методы. К наиболее часто используемым методам относятся рентгеноструктурный анализ, нейтронография и молекулярная динамика.

Рентгеноструктурный анализ позволяет изучать координационные числа и радиальные функции распределения молекул $g(r)$. В свою очередь рассматриваемые функции описывают взаимосвязь (корреляцию) между частицами в системе [4]. На рис. 1 представлена радиальная функция распределения для жидкого аргона при температуре 85 К.

Молекулярная динамика используется для моделирования взаимодействий между частицами в жидкости в наномасштабе с учетом межмолекулярного (ван-дер-ваальсова) взаимодействия.

Этот метод позволяет подробно изучить процессы образования и разрушения кластеров, а также предсказать их влияние на макроскопические свойства жидкости. Однако на вопрос о тонкой структуре кластера, о роли эффекта Ефимова [5] молекулярная динамика в настоящее время не дает четкого ответа и вопрос о формировании кластеров остается дискуссионным.

Кластерные модели [6] успешно используются во многих сферах науки и промышленности благодаря их способности описывать сложные системы [7] и процессы [8], которые применяют в следующих областях:

1. Нефтехимическая промышленность – модели позволяют детально исследовать фазовые переходы углеводородов, а также предсказывать их физико-химические свойства при изменении внешних условий (температура и давление). Это особенно важно для оптимизации технологических

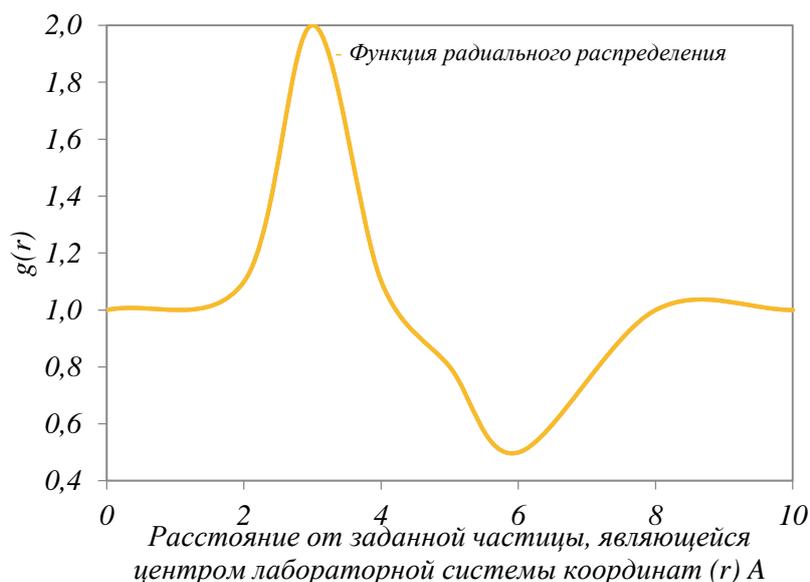


Рис. 1. Радиальная функция распределения для аргона при температуре 85 К
Fig. 1. Radial distribution function for argon at 85 K

процессов, связанных с добычей, переработкой и транспортировкой нефти и газа [9].

2. Биофизика – анализ поведения биологических жидкостей (крови или плазмы) невозможен без учета кластеризации [10]. Эти исследования имеют большое значение для медицинской диагностики и разработки новых методов лечения [11].

3. Материаловедение – в области нанотехнологий кластерные модели используются для проектирования материалов с заданными характеристиками (повышенная прочность, теплоустойчивость или электрическая проводимость).

В последние годы наблюдается значительное расширение исследовательского интереса к поведению жидкостей в экстремальных условиях, включая сверхвысокие температуры, давления и воздействие внешних полей. Особое внимание уделяется наноструктурированным жидкостям, где формируются кластеры с уникальными характеристиками. Современные методы (молекулярная динамика) позволяют не только моделировать подобные системы, но и выявлять новые закономерности в их поведении. Применение технологий машинного обучения упрощает обработку данных и ускоряет поиск решений.

Одним из ключевых направлений исследований является изучение влияния внешних факторов (электрические и магнитные поля) на формирование и развитие кластеров в жидкостях [12]. Эти воздействия существенно изменяют их структуру, размеры и временные характеристики.

В жидких кристаллах под действием электрических полей наблюдается упорядочение ориентации молекул, что приводит к изменениям в плотности, форме и геометрии кластеров.

Исследования показали, что переменные электрические поля могут вызывать динамические колебания плотности кластеров, что оказывает влияние на их оптические и диэлектрические свойства.

Результаты подобных экспериментов открывают широкие перспективы для создания жидкостей с регулируемыми характеристиками (электропроводящие или магнитные жидкости). Эти материалы находят применение в устройствах новой генерации, например, в умных системах управления или адаптивной оптике.

В настоящей работе было проведено теоретическое исследование структурных перестроек жидких аренов с позиции кластерной модели строения жидкостей с использованием методов статистической термодинамики и ИК-спектроскопии [13].

Полученные в ходе вычислений колебательные и либрационные частоты димеров представлены в табл. 2.

Жидкие металлы (ртуть, галлий и другие) [14; 15] представляют собой сложные системы, в которых кластеры формируются благодаря сильным межатомным взаимодействиям. Для их описания часто используется модель Линнарда-Джонса, которая эффективно описывает взаимодействия между атомами в условиях высоких температур и давления. Например, исследования жидкого галлия продемонстрировали, что при температуре, близкой к точке плавления, атомы в кластерах образуют упорядоченные структуры, похожие на твердые тела. Это уникальное поведение наблюдается даже при значительных температурных флуктуациях, что указывает на высокую стабильность подобных систем.

Важным инструментом для изучения динамических характеристик кластеров является метод комбинационного рассеяния света [16]. С его помощью можно анализировать временные корреляции в движении молекул, а также исследовать процессы образования, распада и рекомбинации кластеров.

В ходе одного из экспериментов проводили анализ кластеров в углеводородных жидкостях. Полученные данные показали, что малые кластеры, состоящие из 3 – 10 молекул, имеют существенно более короткое время жизни по сравнению с крупными образованиями. Это связано с высокой подвижностью молекул в рассматриваемых кластерах, что делает их более чувствительными к изменениям окружающей среды. Данные исследования находят применение в разработке инновационных видов топлива с улучшенными теплофизическими свойствами. Учет поведения кластеров позволяет повысить эффективность процессов горения и снизить выбросы вредных веществ.

В настоящее время для анализа и прогнозирования поведения кластеров начали активно применяться методы машинного обучения. Последнее позволяет находить корреляции между структурными и термодинамическими параметрами кластеров в жидкостях. Одним из подходов является использование нейронных сетей для предсказания размеров кластеров в зависимости от температуры и плотности жидкости. В одном из недавних исследований была разработана модель машинного обучения для предсказания времени жизни кластеров в жидких углеводородах. Эта модель была обучена на основе данных молекулярно-динамических симуляций и экспериментальных результатов, что позволило значительно улучшить точность прогнозов и ускорить вычисления. Рассматриваемые технологии могут стать основой для создания новых материалов с заданными свойствами.

Колебательные и либрационные частоты димеров
Table 2. Oscillatory and libration frequencies of dimers

Конфигурация димера	ΔH_{dim} , ккал/моль	r , Å	ω_{vib} (расчет по (1)), см ⁻¹	ω_{vib} (эксперимент), см ⁻¹	ϵ_0/k , К	J_{dim} , 10 ⁻⁴⁵ кг·м ²	ω^*_{lib} (расчет по (2)), см ⁻¹	ω^*_{lib} (эксперимент), см ⁻¹
Бензол [2 – 4]								
Sandwich	-1,124	4,03	57,5	60	567	5,86	8,24 14,7	6,0 11
Parallel-displaced	-1,983	4,011	76,8	78	1000	8,79	9,0 16,9	11 21
T-shaped	-1,938	5,137	59,2	61	978	4,48	12,4 22,1	11 21
Толуол [2; 3]								
Параллельная	-3,50	4,89	77,0	81	1768	6,67	19,3 34,5	23 30
Антипараллельная	-4,30	3,40	122,6	118	2167	7,48	20,2 36,0	23 42
Хлорбензол [2]								
Димер 1	-4,92	4,28	94,2	107	2481	10,64	22,8 12,8	23 –
Димер 2	-4,63	4,05	96,7	107	2333	10,28	22,5 12,6	23 –

Отдельно следует отметить работы, посвященные созданию макроскопических бионических роботов [17], и, тесно связанные с ними, исследования по проектированию искусственных мышц [18] на основе жидких металлов [19]. Особенно перспективным для этих целей является эвтектический галлий – индий (EGaIn), поскольку он по своей природе хорошо деформируем и способен генерировать значительную силу и изменение формы посредством стимуляции низким напряжением [20].

Выводы

Полученные результаты теоретических исследований, посвященных процессам кластеризации в жидкостях и особенностям протекания в них физических процессов, в частности результаты

исследований по спектрам ИК-излучения в жидких аренах, находятся в удовлетворительном согласии с экспериментальными данными. При этом электромагнитное излучение в далекой области ИК-спектра жидкости может быть связано с формированием и развалом кластеров, то есть с энергетической перестройкой кластерных систем.

Современные методы моделирования и экспериментальные данные позволяют глубже изучить рассматриваемый процесс кластеризации и использовать его для прогнозирования поведения жидкостей в самых разных условиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Горлова М.Р. Кластеры в жидкостях. В кн.: *Перспективные материалы науки, технологий и производства. Сборник научных ста-*

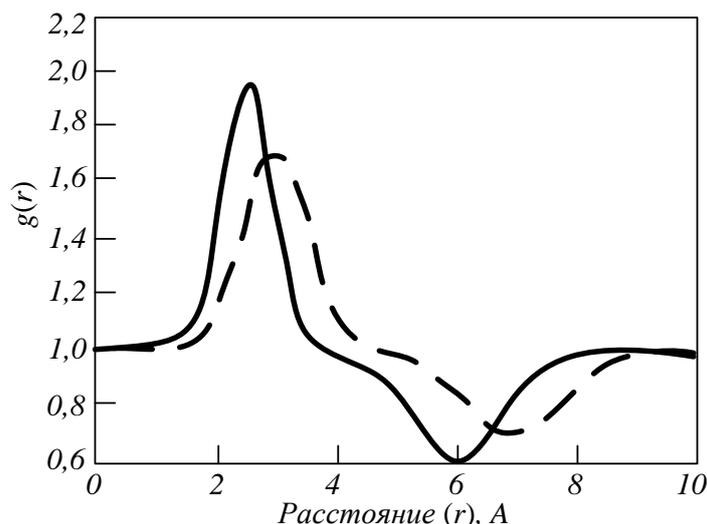


Рис. 2. Моделирование кластеров криптона при изменении температуры [8]:
 — и - - - - - скопления криптона при низкой и высокой температурах
 Fig. 2. Simulation of Krypton clusters under temperature change [8]:
 — and - - - - - krypton accumulations at low and high temperatures

- тей Международной научно-практической конференции. Курск: изд. ЮЗГУ, 2022:81–89.
2. Неручев Ю.А., Рышкова О.С., Радченко А.К., Шкурина В.А. Кластерная структура простой жидкости. В кн.: *Нанотехнологии: образование, наука, инновации. Сборник статей XI Всероссийской научно-практической конференции*. Курск: изд. Курский государственный университет. 2020;11:131–135.
 3. Сабиров Л.М., Исмаилов Ф.Р., Кадилов Ш.А., Каршибаев Ш.Э. Температурные и концентрационные зависимости соотношения Ландау-Плачека в водных растворах γ -пиколина. *Журнал технической физики*. 2020;128(12):1837–1841.
 4. Герман Е.И. *Теплофизические свойства и структурные характеристики аргона в условиях термобарического воздействия по данным компьютерных экспериментов*. Автореф. дисс. к-та. техн. наук. Улан-Удэ. 2023:23.
 5. Мельников Г.А., Игнатенко Н.М., Сучилкин В.В., Громков А.С. Формирование кластерных систем в хаотичных конденсированных средах. *Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии*. 2023;13(2):164–176.
 6. Клумов Б.А. Кластеризация дефектов и кристаллитов в двумерной жидкости Юкавы. *Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики*. 2024;120(9):675–680. <https://doi.org/10.31857/S0370274X24110049>
 7. Gao Y., Fang H., Ni K. A hierarchical clustering method of hydrogen bond networks in liquid water undergoing shear flow. *Scientific Reports*. 2021;11(9542). URL: <https://www.nature.com/articles/s41598-021-88810-7> (дата обращения: 01.03.2025).
 8. Yu L., Qi X., Liu Y. et al. Transportable, endurable, and recoverable liquid metal powders with mechanical sintering conductivity for flexible electronics and electromagnetic interference shielding. *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2022;14(42):48150–48160.
 9. Терещенко С.Н., Осипов А.Л., Моисеева Е.Д. Прогнозирование состава широкой фракции легких углеводородов методами машинного обучения при трубопроводной транспортировке. *Автоматрия*. 2022;58(1):104–110.
 10. Павлов А.Н. Исследование реакции кластеров в водной среде на электромагнитное воздействие. *Биомедицинская радиоэлектроника*. 2020;5:72–79.
 11. Dong J., Peng Y., Nie X. etc. Hierarchically designed super-elastic metafabric for thermal-wet comfortable and antibacterial epidermal electrode. *Advanced Functional Materials*. 2022;32(48):2209762–2209774.
 12. Vasco M. Worlitzer, Gil Ariel, Avraham Be'er, Holger Stark, Markus Bär and Sebastian Heidenreich. Turbulence-induced clustering in compressible active fluids. *Soft Matter*. 2021;17(46):10447–10457.
 13. Мельников Г.А., Игнатенко Н.М., Громков А.С., Сучилкин В.В. О структурных превращениях в жидких аренах. В кн.: *Необратимые процессы в природе и технике: XIII Всероссийская конференция (Москва, 28-30 января 2025 года). Сборник статей*. Москва: изд. Московского гос. тех. ун-та имени Н.Э. Баумана, 2025;1:164–167.

14. Guixuan Lu, Erli Ni, Yanyan Jiang, Weikang Wu, Hui Li Room-Temperature Liquid Metals for Flexible Electronic Devices. *Small*. 2024;20(9):e2304147.
15. Kim J.H., Park Y.J., Kim S. etc. Effect of surrounding solvents on interfacial behavior of gallium-based liquid metal droplets. *Materials*. 2022;15(3):706–715. <https://doi.org/10.3390/ma15030706>.
16. Мельников Г.А., Игнатенко Н.М., Петрова Л.П., Громков А.С., Манжос О.А. Исследование комбинационного рассеяния света в жидких аренах и их галогенозамещенных в низкочастотной области спектра. *Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии*. 2024;14(1):88–103. <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2024-14-1-88-103>
17. Zhao J., Li H., Bi X. etc. Rapidly reversible discoloration of liquid metal by contact or separation. *Materials Chemistry and Physics*. 2022;291:126726. <https://doi.org/10.1016/j.matchphys.2022.126726>
18. Shu J., Ge D.A., Wang E., Ren H., Cole T., Tang S.Y., Li X., Zhou X., Li R., Jin H., Li W., Dickey M.D., Zhang S. A Liquid Metal Artificial Muscle. *Adv Mater*. 2021;33(43):e2103062.
19. Tao Y., Han F., Shi C. et al. Liquid Metal-Based Flexible and Wearable Sensor for Functional Human – Machine Interface. *Micromachines*. 2022;13(9):1429–1443.
20. Liao J., Majidi C. Muscle-Inspired Linear Actuators by Electrochemical Oxidation of Liquid Metal Bridges. *Advanced Science*. 2022;9(26). URL: <https://advanced.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/advs.202201963> (дата обращения: 01.03.2025).
4. German E.I. *Thermophysical properties and structural characteristics of argon under thermobaric conditions according to computer experiments*. Avtoref. diss. k-ta. tekhn. nauk. Ulan-Ude. 2023:23. (In Russ.).
5. Mel'nikov G.A., Ignatenko N.M., Suchilkin V.V., Gromkov A.S. Formation of cluster systems in chaotic condensed media. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii*. 2023;13(2):164–176. (In Russ.).
6. Klumov B.A. Clusterization of defects and crystallites in a two-dimensional Yukawa liquid. *Pis'ma v Zhurnal eksperimental'noi i teoreticheskoi fiziki*. 2024;120(9):675–680. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S0370274X24110049>
7. Gao Y., Fang H., Ni K. A hierarchical clustering method of hydrogen bond networks in liquid water undergoing shear flow. *Scientific Reports*. 2021;11(9542). URL: <https://www.nature.com/articles/s41598-021-88810-7> (accessed: 01.03.2025).
8. Yu L., Qi X., Liu Y. et al. Transportable, endurable, and recoverable liquid metal powders with mechanical sintering conductivity for flexible electronics and electromagnetic interference shielding. *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2022;14(42):48150–48160.
9. Tereshchenko S.N., Osipov A.L., Moiseeva E.D. Forecasting the composition of a wide fraction of light hydrocarbons by machine learning methods in pipeline transportation. *Avtometriya*. 2022;58(1):104–110. (In Russ.).
10. Pavlov A.N. Investigation of the reaction of clusters in the aquatic environment to electromagnetic effects. *Biomeditsinskaya radioelektronika*. 2020;5:72–79. (In Russ.).
11. Dong J., Peng Y., Nie X. etc. Hierarchically designed super-elastic metafabric for thermal-wet comfortable and antibacterial epidermal electrode. *Advanced Functional Materials*. 2022;32(48):2209762–2209774.
12. Vasco M. Worlitzer, Gil Ariel, Avraham Be'er, Holger Stark, Markus Bär and Sebastian Heidenreich. Turbulence-induced clustering in compressible active fluids. *Soft Matter*. 2021;17(46):10447–10457.
13. Mel'nikov G.A., Ignatenko N.M., Gromkov A.S., Suchilkin V.V. On structural transformations in liquid arenas. In: *Irreversible Processes in Nature and Technology: The XIII All-Russian Conference (Moscow, January 28-30, 2025)*. Collection of articles. Moscow: izd. Moskovskogo gos. tekhn. un-ta imeni N.E. Bauman, 2025;1:164–167. (In Russ.).
14. Guixuan Lu, Erli Ni, Yanyan Jiang, Weikang Wu, Hui Li Room-Temperature Liquid Metals for

REFERENCES

1. Gorlova M.R. Clusters in liquids. In: *Advanced Materials of Science, Technology and Production. Collection of scientific articles of the International Scientific and Practical Conference*. Kursk: izd. YuZGU, 2022:81–89. (In Russ.).
2. Neruchev Yu.A., Ryshkova O.S., Radchenko A.K., Shkurina V.A. Cluster structure of a simple liquid. In: *Nanotechnology: education, Science, Innovation. Collection of articles of the XI All-Russian Scientific and Practical Conference*. Kursk: izd. Kurskii gosudarstvennyi universitet. 2020;11:131–135. (In Russ.).
3. Sabirov L.M., Ismailov F.R., Kadirov Sh.A., Karshibaev Sh.E. Temperature and concentration dependences of the Landau-Placzek ratio in aqueous solutions of γ -picoline. *Zhurnal tekhnicheskoi fiziki*. 2020;128(12):1837–1841. (In Russ.).

- Flexible Electronic Devices. *Small*. 2024;20(9):e2304147.
15. Kim J.H., Park Y.J., Kim S. etc. Effect of surrounding solvents on interfacial behavior of gallium-based liquid metal droplets. *Materials*. 2022;15(3):706–715.
<https://doi.org/10.3390/ma15030706>.
 16. Mel'nikov G.A., Ignatenko N.M., Petrova L.P., Gromkov A.S., Manzhos O.A. Investigation of raman scattering of light in liquid arenes and their halogenated ones in the low-frequency range of the spectrum. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudar-stvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii*. 2024;14(1):88–103. (In Russ.).
<https://doi.org/10.21869/2223-1528-2024-14-1-88-103>
 17. Zhao J., Li H., Bi X. etc. Rapidly reversible discoloration of liquid metal by contact or separation. *Materials Chemistry and Physics*. 2022;291:126726.
<https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2022.126726>
 18. Shu J., Ge D.A., Wang E., Ren H., Cole T., Tang S.Y., Li X., Zhou X., Li R., Jin H., Li W., Dickey M.D., Zhang S. A Liquid Metal Artificial Muscle. *Adv Mater*. 2021;33(43):e2103062.
 19. Tao Y., Han F., Shi C. et al. Liquid Metal-Based Flexible and Wearable Sensor for Functional Human – Machine Interface. *Micromachines*. 2022;13(9):1429–1443.
 20. Liao J., Majidi C. Muscle-Inspired Linear Actuators by Electrochemical Oxidation of Liquid Metal Bridges. *Advanced Science*. 2022;9(26).
URL: <https://advanced.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/advs.202201963> (accessed: 01.03.2025).

Сведения об авторах

Николай Михайлович Игнатенко, д.ф.-м.н., профессор кафедры нанотехнологий, микроэлектроники, общей и прикладной физики, Юго-Западный государственный университет

E-mail: inmkstu@mail.ru

ORCID: 0000-0002-2807-9887

SPIN-код: 3931-5320

Андрей Александрович Солдатов, аспирант кафедры нанотехнологий, микроэлектроники, общей и прикладной физики, Юго-Западный государственный университет

E-mail: soldatovandal@gmail.com

ORCID: 0009-0003-1108-8511

Николай Юрьевич Еришов, студент кафедры финансов и кредита, Юго-Западный государственный университет

E-mail: kolia.04071@yandex.ru

ORCID: 0009-0008-5169-4213

SPIN-код: 8238-2385

Людмила Павловна Петрова, к.ф.-м.н., доцент кафедры нанотехнологий, микроэлектроники, общей и прикладной физики, Юго-Западный государственный университет

E-mail: luci78@mail.ru

ORCID: 0009-0007-8883-5983

SPIN-код: 7656-4073

Information about the author:

Nikolay M. Ignatenko, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor of the Department of Nanotechnology, Microelectronics, General and Applied Physics, Southwest State University

E-mail: inmkstu@mail.ru

ORCID: 0000-0002-2807-9887

SPIN-код: 3931-5320

Andrey A. Soldatov, postgraduate student at the Department of Nanotechnology, Microelectronics, General and Applied Physics, Southwest State University

E-mail: soldatovandal@gmail.com

ORCID: 0009-0003-1108-8511

Nikolay Yu. Yershov, student at the Department of Finance and Credit, Southwest State University

E-mail: kolia.04071@yandex.ru

Lyudmila P. Petrova, Cand. Sci. (Phys.-Math.), Associate Professor of the Department of Nanotechnology, Microelectronics, General and Applied Physics, Southwest State University

E-mail: luci78@mail.ru

ORCID: 0009-0007-8883-5983

SPIN-код: 7656-4073

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Поступила в редакцию 10.02.2025

После доработки 24.02.2025

Принята к публикации 04.03.2025

Received 10.02.2025

Revised 24.02.2025

Accepted 04.03.2025