

А. Ф. Максимов, М. А. Сажина, К. В. Холин,
Г. А. Кутырев

СТРУКТУРНАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ ОЛИГОГИДРОКСИЭТИЛАМИНОЭТИЛУРЕТАНОВЫХ ДЕНДРИМЕРОВ

Ключевые слова: дендример, олигогидроксиэтиламиноэтилкарбаматы, агрегация макромолекул.

В этом исследовании изучены структурные и коллоидные свойства дендримеров олигогидроксиэтиламиноэтилуретана с первой по четвертую генераций (G1–G4). Все поколения демонстрируют аморфное фазовое состояние, подтвержденное рентгеноструктурным анализом, с характерным широким пиком при $2\theta = 10\text{--}30^\circ$. Молекулярное моделирование (метод РМЗ) выявляет эволюцию структуры с ростом генерации: размеры дендримеров увеличиваются с 1.45×0.76 нм (G1) до 4.12×2.71 нм (G4), в то время как соотношение сторон уменьшается ($1.91 \rightarrow 1.52$), что указывает на прогрессивное формирование сферической архитектуры. Рост генераций дендримеров отражает иерархическую древовидную самоорганизацию. Динамическое светорассеяние (DLS) демонстрирует зависимость гидродинамических диаметров от концентрации: G1: $977 \rightarrow 137$ нм ($1 \times 10^{-3} \rightarrow 1 \times 10^{-6}$ моль·л⁻¹), G2: $1621 \rightarrow 119$ нм и G3: $598 \rightarrow 105$ нм. Дендример G4 (~360 нм) проявляет уникальную устойчивость к агрегации. Анализ дендримеров с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) подтверждает наличие монодисперсных сферических частиц (90–120 нм) в G1, G3 и G4, в то время как в G2 наблюдаются более крупные агрегаты (150–200 нм). Примечательно, что расхождения результатов методов DLS и СЭМ для G4 (360 нм против 90–120 нм) вероятно связано с влиянием гидратации G4 в DLS и артефакты сушки в СЭМ. Агрегаты сохраняют стабильность после сушки (90–200 нм), что крайне важно для таких областей применения, как доставка лекарств, катализ и создание функциональных материалов. Полученные результаты позволяют разрабатывать дендритные системы с программируемыми свойствами для нанотехнологий и биомедицины.

A. F. Maksimov, M. A. Sazhina, K. V. Kholin,
G. A. Kutirev

STRUCTURAL ORGANISATION OF OLIGOHYDROXYETHYLAMINOETHYLURETHANE DENDRIMERS

Keywords: dendrimer, oligohydroxyethylaminoethyl carbamates, macromolecule agglomeration.

This study investigates the structural and colloidal properties of oligohydroxyethylaminoethyl urethane dendrimers from the first to the fourth generations (G1–G4). All generations demonstrate an amorphous phase state, confirmed by X-ray structural analysis, with a characteristic broad peak at $2\theta = 10\text{--}30^\circ$. Molecular modelling (PM3 method) reveals the evolution of the structure with increasing generation: the sizes of dendrimers increase from 1.45×0.76 nm (G1) to 4.12×2.71 nm (G4), while the aspect ratio decreases ($1.91 \rightarrow 1.52$), indicating the progressive formation of a spherical architecture. The growth of dendrimer generations reflects hierarchical tree-like self-organisation. Dynamic light scattering (DLS) demonstrates the dependence of hydrodynamic diameters on concentration: G1: $977 \rightarrow 137$ nm ($1 \times 10^{-3} \rightarrow 1 \times 10^{-6}$ mol·l⁻¹), G2: $1621 \rightarrow 119$ nm, and G3: $598 \rightarrow 105$ nm. Dendrimer G4 (~360 nm) exhibits unique resistance to aggregation. Analysis of dendrimers using scanning electron microscopy (SEM) confirms the presence of monodisperse spherical particles (90–120 nm) in G1, G3 and G4, while larger aggregates (150–200 nm) are observed in G2. It is noteworthy that the discrepancy between the DLS and SEM results for G4 (360 nm vs. 90–120 nm) is likely due to the influence of G4 hydration in DLS and drying artifacts in SEM. The aggregates remain stable after drying (90–200 nm), which is extremely important for applications such as drug delivery, catalysis, and the creation of functional materials. The results obtained allow the development of dendritic systems with programmable properties for nanotechnology and biomedicine.

Введение

Дендримеры – это высокоразветвленные монодисперсные макромолекулы с уникальной архитектурой, которые находят широкое применение в различных областях науки и техники, включая наномедицину, катализ, доставку лекарственных препаратов и создание функциональных материалов [1–3]. Их специфическая структура, сочетающая большое количество терминальных функциональных групп и сферическую форму, обеспечивает высокую реакционную способность и возможность точного контроля физико-химических свойств [4–6].

Дендримеры РАМАМ представляют собой сильно разветвленные полимеры с глобулярной трехмерной архитектурой, построенные на основе этилендиаминового ядра и ветвей, сформированных из метилакрилата и этилендиамина [7, 8]. Они имеют

такие концевые функциональные группы, как –NH₂, –OH или –COOH на поверхности и относительно гидрофобные внутренние полости [9].

Размеры дендримеров РАМАМ зависят от генераций (G): от примерно 1.1 нм для G1 до 12.4 нм для более высоких поколений. С увеличением генерации растет количество концевых ветвей и функциональных групп, что влияет на их физико-химические свойства и биологическое поведение [10].

Дендримеры РАМАМ обладают способностью взаимодействовать с биомолекулами, например, ингибируя активность ферментов системы фибринолиза (tPA и uPA) за счет связывания с положительно заряженными центрами и изменения конформации белков. При этом собственная активность плазмينا практически не уменьшается.

Ингибирующий эффект усиливается с ростом концентрации и поколения дендримера [11].

Дендримеры РАМАМ также исследуются как средства доставки лекарств и антиамилоидные агенты. Они способны препятствовать агрегации амилоидных пептидов и способствовать дезагрегации фибрилл, причем эффективность зависит от поколения и концентрации дендримера. Высшие поколения (G3–G5) более эффективны в этих процессах [12].

Полипропиленминовые (PPI) дендримеры имеют структуру, основанную на пропиленминовых ветвях, и также обладают разветвленной глобулярной архитектурой, но отличаются по химическому строению от РАМАМ [13, 14].

Дендримеры PPI, модифицированные концевыми мальтозными группами демонстрируют способность уменьшать агрегацию амилоидных пептидов, причем эффективность зависит от поколения и кислотности среды. При низком pH повышается степень протонирования аминогрупп дендримера и гистидиновых остатков пептида, что усиливает взаимодействие и ингибирует амилоидогенез [15, 16].

Аминоэтиленкарбонатный дендример имеет сферическую морфологию агрегатов с преобладанием фракций с диаметром частиц от 86 до 95 нм [17], а палладиевые комплексы на его основе эффективно гидрируют α -метилстирол до кумола в мягких условиях [18, 19].

Вместе с тем для успешного внедрения таких систем необходимы знания их структурной организации на основе комплексного исследования, сочетающего экспериментальные методы и молекулярное моделирование.

Целью данной работы является всестороннее изучение структурных особенностей и поведения олигогидроксиэтиламиноэтилуретановых дендримеров первой–четвертой генераций (G1–G4) с использованием методов РСА, молекулярного моделирования, динамического светорассеяния и электронной сканирующей микроскопии. Это позволит выявить закономерности формирования их структуры, оценить влияние концентрации на агрегацию и стабильность частиц, а также определить перспективы их применения в различных областях науки и техники.

Экспериментальная часть

В работе использовали олигогидроксиэтиламиноэтилуретановые дендримеры первой–четвертой генераций (G1–G4) с молекулярной массой 498, 1152, 2504, 5164 г/моль, числом терминальных гидроксильных групп 6, 12, 24, 48 и термостабильностью около 104–106 °С. Рентгеноструктурный анализ проводили на рентгеновском дифрактометре XRD-7000S (Shimadzu, Япония). Структуры образцов оптимизированы полуэмпирическим методом PM3 в программном пакете Gaussian 09 для определения условных размеров макромолекул. Гидродинамический диаметр частиц образцов в водном растворе ($1 \cdot 10^{-3}$ – $1 \cdot 10^{-6}$ моль·л⁻¹) определен

методом динамического рассеяния света на анализаторе размеров частиц Litesizer™ 500 (Anton Paar GmbH, Австрия) при температуре 25 °С и боковом угле измерения 90°. Образцы в виде водных растворов ($1 \cdot 10^{-6}$ моль·л⁻¹) наносили на алюминиевую фольгу и сушили 3 дня. Токопроводящий углеродный слой напыляли на установке Quorum150T ES Plus. Морфологию частиц анализировали с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) Carl Zeiss Evo LS 10 (Германия) с детектором вторичных электронов. Параметры СЭМ: ускоряющее напряжение 6 кВ, ток зонда 200 пА. Диаметр частиц рассчитывали в программе ImageJ на основе полученных изображений.

Обсуждение результатов

Олигогидроксиэтиламиноэтилуретановые дендримеры первой–четвертой генераций (G1–G4) имеют молекулярную массу 498, 1152, 2504, 5164 г/моль, число гидроксильных групп 6, 12, 24, 48 и термостабильность около 104–106 °С соответственно.

Рентгеновские спектры соединений (G1–G4) представлены на рис. 1. Наблюдается схожая аморфная структура дендримеров, о чем свидетельствует широкий аморфный дифракционный пик в диапазоне $2\theta = 10$ –30°. Этот широкий пик имеет центр около 19–20° и соответствует дендритной структуре соединений [20].

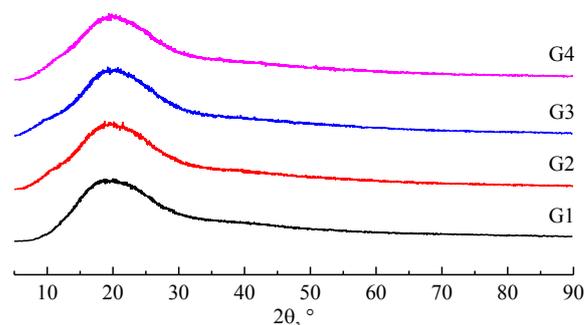


Рис. 1 – Рентгенограммы дендримеров (G1–G4)

Fig. 1 – X-ray radiographs of dendrimers (G1–G4)

Молекулы триэтанолamina, диметилкарбоната, диэтанолamina и дендримеров первой–четвертой генераций (G1–G4) были оптимизированы с использованием полуэмпирического метода PM3 в программе Gaussian 09 для определения их пространственной конфигурации. Для наглядного отображения изменений формы дендримеров в зависимости от поколения на рис. 2А представлены изображения окончательных оптимизированных структур каждого поколения. На основе результатов оптимизации были рассчитаны размеры дендримеров: G1 - 1.45×0.76 нм, G2 - 2.23×1.22 нм, G3 - 3.34×1.90 нм, G4 - 4.12×2.71 нм. При этом наблюдается тенденция к уменьшению соотношения сторон: 1.91 (G1), 1.83 (G2), 1.76 (G3) и 1.52 (G4), что свидетельствует о постепенном приближении формы дендримера к сферической с увеличением поколения [21]. Полученные результаты согласуются с данными

диаметров дендримеров ПАМАМ для первой генерации 1.9 нм, для второй генерации 2.6 нм, для третьей генерации 3.6 нм и для четвертой генерации 4.4 нм [22]. Удивительным и примечательным является то, что процесс роста генерации дендримеров напоминает этапы развития дерева. Подобие в структурной организации и последовательности формирования ветвлений отражает природные принципы самоорганизации и иерархического построения сложных систем. Как и в случае с деревом, где рост происходит поэтапно с образованием новых ветвей и ответвлений, дендримеры формируются посредством последовательного наращивания слоев и разветвлений, что обеспечивает их характерную сферическую и многогранную архитектуру (рис. 2B) [23].

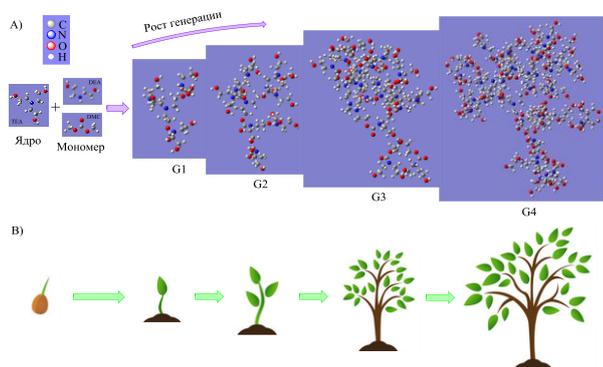


Рис. 2 – Оптимизированные структуры ТЭА, ДМК, ДЭА и дендримеров (G1-G4) в программе Gaussian (A) и этапы роста дерева (B)

Fig. 2 – Optimized structures of TEA, DMK, DEA and dendrimers (G1-G4) in Gaussian software (A) and tree growth steps (B)

Динамическое светорассеяние показало, что гидродинамические диаметры дендримеров (G1–G4) в воде уменьшаются с понижением концентрации и имеют более высокие значения по сравнению с реальными диаметрами молекул (рис. 3). Такая зависимость объясняется уменьшением агрегации частиц при понижении концентрации, что приводит к снижению их эффективного размера в растворе [24]. Это типично для коллоидных систем, где при высокой концентрации частицы склонны образовывать агрегаты, увеличивая тем самым средний размер. Для дендримера первой генерации гидродинамический диаметр уменьшался с 977 нм при $1 \cdot 10^{-3}$ моль·л⁻¹ до 137 нм при $1 \cdot 10^{-6}$ моль·л⁻¹. Аналогичная тенденция наблюдалась и для второй генерации (с 1621 нм до 119 нм) и третьей генерации (с 598 нм до 105 нм). Исключением стала четвертая генерация, где при самой низкой концентрации размер частиц практически не изменился (360 нм при $1 \cdot 10^{-6}$ моль·л⁻¹ против 366 нм при $1 \cdot 10^{-4}$ моль·л⁻¹), что может указывать на более устойчивую структуру агрегатов даже при низких концентрациях. Таким образом, динамическое светорассеяние подтвердило, что концентрация существенно влияет

на размер и распределение частиц дендримеров в растворе. Оптимальная концентрация $1 \cdot 10^{-6}$ моль·л⁻¹ обеспечивает минимальную полидисперсность, что является важным условием для точного определения размеров частиц методом СЭМ.

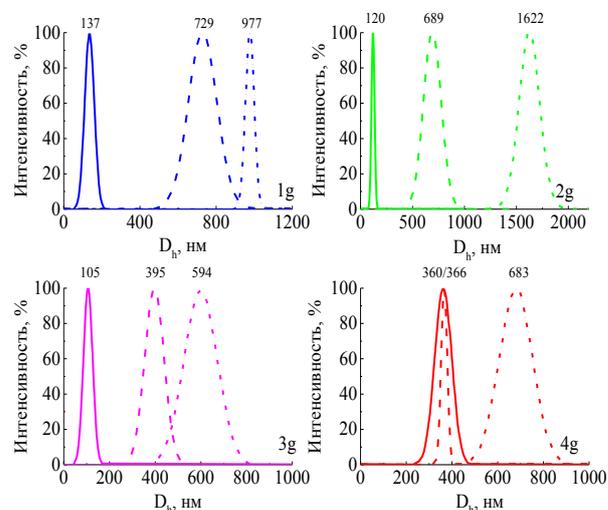


Рис. 3 – Гидродинамический диаметр частиц дендримеров (G1–G4) в воде: штрихпунктирная линия $1 \cdot 10^{-3}$ моль·л⁻¹, штриховая линия $1 \cdot 10^{-4}$ моль·л⁻¹ и сплошная линия $1 \cdot 10^{-6}$ моль·л⁻¹

Fig. 3 – Hydrodynamic diameter of dendrimer particles (G1-G4) in water: dash-dotted line $1 \cdot 10^{-3}$ mol·l⁻¹, dashed line $1 \cdot 10^{-4}$ mol·l⁻¹ and solid line $1 \cdot 10^{-6}$ mol·l⁻¹

На рис. 4 представлены СЭМ изображения частиц дендримеров первой-четвертой генераций (G1–G4) с распределением их диаметров. Анализ микрофотографий показал преобладание сферических частиц для соединений первой, третьей и четвертой генераций с узким распределением размеров (90–120 нм), что свидетельствует о высокой монодисперсности и стабильности систем [25]. Только для соединения второй генерации наблюдается смещение распределения в область 150–200 нм [26].

Сравнение данных СЭМ с результатами динамического светорассеяния выявило согласованность для первых трех генераций. Например, для соединения (G1) значения DLS (137 нм) и СЭМ (90–120 нм) соответствуют масштабу нанометровых частиц с учетом различий в методиках (гидродинамический диаметр и сухая частица). Расхождение наблюдается для соединения (G4). Если метод DLS показал размер 360 нм, то СЭМ-анализ зафиксировал частицы 90–120 нм. Это противоречие может объясняться:

1) Артефактами подготовки образцов. При высушивании образцов для СЭМ агрегаты дендримера (G4) могли разрушаться, уменьшая наблюдаемый размер;

2) Различием условий измерения. В DLS частицы анализируются в гидратированном состоянии, где

более развитые разветвления (G4) увеличивают гидродинамический диаметр;

3) Структурными особенностями. Высокая плотность функциональных групп в (G4) может способствовать образованию рыхлых надмолекулярных комплексов в растворе, которые не сохраняются при иммобилизации на подложке.

Полученные данные подчеркивают важность комбинированного использования методов (СЭМ + DLS) для корректной интерпретации размеров наночастиц. Снижение размера (G4) в СЭМ может также указывать на компактизацию структуры при переходе к высшим поколениям, что требует дополнительного изучения методами молекулярного моделирования.

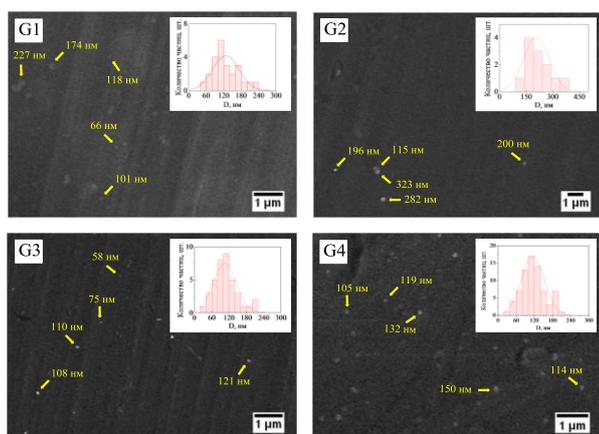


Рис. 4 – Микрофотографии СЭМ с распределением диаметров частиц дендримеров (G1-G4)

Fig. 4 – SEM micrographs showing the distribution of dendrimer particle diameters (G1-G4)

Полученные результаты позволяют предположить, что дендримеры всех четырех поколений (G1–G4) в водных средах склонны к агрегации, образуя агрегаты частиц, размеры которых после сушки в значительной степени сохраняются в диапазоне 90–200 нм (рис. 5). Такая устойчивость частиц после удаления растворителя свидетельствует о формировании относительно стабильных агрегатов, которые не разрушаются при переходе из жидкой среды в твердое состояние. Агломерация дендримеров в водных растворах объясняется их молекулярной структурой и взаимодействиями между макромолекулами, включая водородные связи и гидрофобные взаимодействия, что типично для высокоразветвленных полимерных систем с гидрофильными ОН концевыми группами. При этом после сушки агрегаты сохраняют свою морфологию, что подтверждается однородным распределением частиц на СЭМ-изображениях и стабильностью их размеров.

Стабильность агрегатов дендримеров в водной среде и сохранение размеров после сушки важны для практического применения, например, в качестве носителей лекарственных веществ или катализаторов, где контролируемый размер и

устойчивость частиц обеспечивают предсказуемое поведение в биологических системах и технологических процессах. Кроме того, сохранение размеров частиц после сушки указывает на возможность формирования устойчивых наноструктур, что может быть полезно для их дальнейшей функционализации и применения в различных областях.

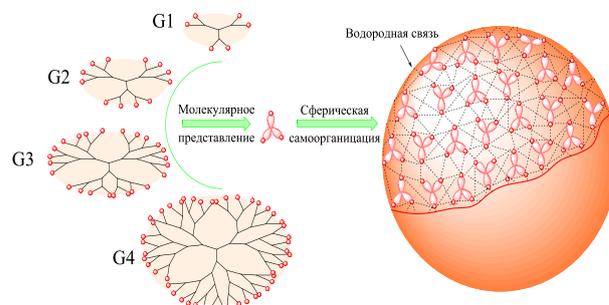


Рис. 5 – Агломерация молекул дендримеров (G1-G4)

Fig. 5 – Agglomeration of dendrimer molecules (G1-G4)

Заключение

Проведенное исследование олигогидроксиэтиламиноэтилетановых дендримеров (G1–G4) выявило ключевые закономерности их структуры и поведения в растворах. Установлено, что для всех дендримеров характерно аморфное фазовое состояние.

Молекулярное моделирование методом РМЗ продемонстрировало эволюцию пространственной конфигурации: размеры дендримеров увеличиваются с 1.45×0.76 нм (G1) до 4.12×2.71 нм (G4), при этом соотношение сторон уменьшается с 1.91 до 1.52, что свидетельствует о последовательном формировании сферической архитектуры.

Динамическое светорассеяние выявило зависимость гидродинамических диаметров от концентрации: G1: $977 \rightarrow 137$ нм ($1 \times 10^{-3} \rightarrow 1 \times 10^{-6}$ моль·л⁻¹), G2: $1621 \rightarrow 119$ нм и G3: $598 \rightarrow 105$ нм. Исключением стал дендример G4, размер частиц которого не зависит от концентрации раствора (~360 нм), что указывает на сильную агрегацию молекул за счет Н-связывания.

СЭМ-анализ подтвердил формирование монодисперсных сферических частиц (90–120 нм) для G1, G3 и G4, тогда как для G2 зафиксирован больший размер (150–200 нм).

Обнаруженная устойчивость агрегатов после сушки (90–200 нм) и их зависимость от концентрации открывают перспективы применения дендримеров в качестве носителей лекарственных средств, каталитических систем и платформ для функционализации.

Расхождения между данными DLS и СЭМ для G4 (360 нм против 90–120 нм) подчеркивают важность комбинированного использования методов исследования, учитывающих как гидратацию макромолекул, так и артефакты пробоподготовки. Полученные результаты создают основу для

разработки дендритных систем с программируемыми свойствами, востребованными в наномедицине и материаловедении.

Благодарности

Работа выполнена за счет гранта Академии наук Республики Татарстан, предоставленного молодым кандидатам наук (постдокторантам) с целью защиты докторской диссертации, выполнения научно-исследовательских работ, а также выполнения трудовых функций в научных и образовательных организациях Республики Татарстан в рамках Государственной программы Республики Татарстан «Научно-технологическое развитие Республики Татарстан» (Соглашение №116/2024-ПД).

Литература

1. A. A. Zolriasatein, *Recent Innov. Chem. Eng.*, **13**, 2, 110-122 (2020).
2. A. A. Chis, C. Dobrea, C. Morgovan, A. M. Arseniu, L. L. Rus, A. Butuca, A. M. Juncan, M. Totan, A. L. Vonica-Tincu, G. Cormos, A. C. Muntean, M. L. Muresan, F. G. Gligor, A. Frum, *Molecules*, **25**, 17, 3982 (2020).
3. A. Akbarzadeh, R. Khalilov, E. Mostafavi, N. Annabi, E. Abasi, T. Kafshdooz, S. Davaran, *Exp. Oncol.*, **40**, 3, 178-183 (2018).
4. D. Huang, D. Wu, *Mater. Sci. Eng. C*, **90**, 713-727 (2018).
5. M. Pérez-Ferreiro, A. M. Abelairas, A. Criado, I. J. Gómez, J. Mosquera, *Polym.*, **15**, 22, 4369 (2023).
6. K. Yamamoto, T. Imaoka, M. Tanabe, T. Kambe, *Chem. Rev.*, **120**, 2, 1397-1437 (2019).
7. E. B. Bahadır, M. K. Sezgentürk, *Talanta*, **148**, 427-438 (2016).
8. H. Viltres, Y. C. López, C. Leyva, N. K. Gupta, A. G. Naranjo, P. Acevedo-Peña, K. S. Kim, *J. Mol. Liq.*, **334**, 116017 (2021).
9. Z. Lyu, L. Ding, A. T. Huang, C. L. Kao, L. Peng, *Mater. Today Chem.*, **13**, 34-48 (2019).
10. P. Kesharwani, *Dendrimer-based nanotherapeutics*, Academic Press. Book ELSIVIER, Oxford, 2021, P. 1280.
11. R. B. Aisina, L. I. Mukhametova, E. M. Ivanova, *Russ. J. Bioorg. Chem.*, **46**, 787-797, (2020).
12. D. A. Moreira, S. D. Santos, V. Leiro, A. P. Pêgo, *Pharmaceutics*, **15**, 4, 1054 (2023).
13. E. Murugan, S. Arumugam, P. Panneerselvam, *Int. J. Polym. Mater. Polym. Biomater.*, **65**, 3, 111-124 (2016).
14. D. Kaur, K. Jain, N. K. Mehra, P. Kesharwani, N. K. Jain, *J. Nanoparticle Res.*, **18**, 1-14 (2016).
15. O. Klementieva, N. Benseny-Cases, A. Gella, D. Appelhans, B. Voit, J. Cladera, *Biomacromolecules*, **12**, 11, 3903-3909 (2011).
16. S. A. Sorokina, Z. B. Shifrina, *Pharmaceutics*, **14**, 4, 760 (2022).
17. А. Ф. Максимов, Б. Р. Яруллин, Х. Э. Харлампи́ди, М. П. Кутырева, Г. А. Кутырев, *Вестник технологического университета*, **27**, 3, 41-46 (2024).
18. Н. Х. Мухаметова, А. Ф. Максимов, Б. Р. Яруллин, М. А. Бочков, Г. А. Кутырев, Э. А. Каралин, Х. Э. Харлампи́ди, *Вестник технологического университета*, **27**, 7, 33-38 (2024).
19. Н. Х. Мухаметова, А. Ф. Максимов, М. А. Бочков, Г. А. Кутырев, Э. А. Каралин, Х. Э. Харлампи́ди, *Вестник технологического университета*, **27**, 10, 33-38 (2024).
20. A. A. Baleb, N. M. Jahed, O. A. Arotiba, S. N. Mailu, N. R. Hendricks, P. G. Baker, E. I. Iwuoha, *J. Electroanal. Chem.*, **652**, 1-2, 18-25 (2011).
21. C. Jana, G. Jayamurugan, R. Ganapathy, P. K. Maiti, N. Jayaraman, A. K. Sood, *J. Chem. Phys.*, **124**, 20, 204719 (2006).
22. R. Esfand, D. A. Tomalia, *Dendrimers and Other Dendritic Polymers*, John Wiley & Sons, 2002, P. 587-604.
23. H. N. Patel, P. M. Patel, *Int. J. Pharm. Bio. Sci.*, **4**, 2, 454-463 (2013).
24. F. Najafi, M. Salami-Kalajahi, H. Roghani-Mamaqani, A. Kahaie-Khosrowshahi, *Colloids Surf. B: Biointerfaces*, **178**, 500-507 (2019).
25. X. Sun, S. Dong, E. Wang, *Macromolecules*, **37**, 19, 7105-7108 (2004).
26. S. Sathiyaraj, K. A. Kumar, A. K. Jailani Shanavas, A.S. Sultan Nasar, *ChemistrySelect*, **2**, 24, 7108-7116 (2017).

References

1. A. A. Zolriasatein, *Recent Innov. Chem. Eng.*, **13**, 2, 110-122 (2020).
2. A. A. Chis, C. Dobrea, C. Morgovan, A. M. Arseniu, L. L. Rus, A. Butuca, A. M. Juncan, M. Totan, A. L. Vonica-Tincu, G. Cormos, A. C. Muntean, M. L. Muresan, F. G. Gligor, A. Frum, *Molecules*, **25**, 17, 3982 (2020).
3. A. Akbarzadeh, R. Khalilov, E. Mostafavi, N. Annabi, E. Abasi, T. Kafshdooz, S. Davaran, *Exp. Oncol.*, **40**, 3, 178-183 (2018).
4. D. Huang, D. Wu, *Mater. Sci. Eng. C*, **90**, 713-727 (2018).
5. M. Pérez-Ferreiro, A. M. Abelairas, A. Criado, I. J. Gómez, J. Mosquera, *Polym.*, **15**, 22, 4369 (2023).
6. K. Yamamoto, T. Imaoka, M. Tanabe, T. Kambe, *Chem. Rev.*, **120**, 2, 1397-1437 (2019).
7. E. B. Bahadır, M. K. Sezgentürk, *Talanta*, **148**, 427-438 (2016).
8. H. Viltres, Y. C. López, C. Leyva, N. K. Gupta, A. G. Naranjo, P. Acevedo-Peña, K. S. Kim, *J. Mol. Liq.*, **334**, 116017 (2021).
9. Z. Lyu, L. Ding, A. T. Huang, C. L. Kao, L. Peng, *Mater. Today Chem.*, **13**, 34-48 (2019).
10. P. Kesharwani, *Dendrimer-based nanotherapeutics*, Academic Press. Book ELSIVIER, Oxford, 2021, P. 1280.
11. R. B. Aisina, L. I. Mukhametova, E. M. Ivanova, *Russ. J. Bioorg. Chem.*, **46**, 787-797, (2020).
12. D. A. Moreira, S. D. Santos, V. Leiro, A. P. Pêgo, *Pharmaceutics*, **15**, 4, 1054 (2023).
13. E. Murugan, S. Arumugam, P. Panneerselvam, *Int. J. Polym. Mater. Polym. Biomater.*, **65**, 3, 111-124 (2016).
14. D. Kaur, K. Jain, N. K. Mehra, P. Kesharwani, N. K. Jain, *J. Nanoparticle Res.*, **18**, 1-14 (2016).
15. O. Klementieva, N. Benseny-Cases, A. Gella, D. Appelhans, B. Voit, J. Cladera, *Biomacromolecules*, **12**, 11, 3903-3909 (2011).
16. S. A. Sorokina, Z. B. Shifrina, *Pharmaceutics*, **14**, 4, 760 (2022).
17. A. F. Maksimov, B. R. Yarullin, H. E. Kharlampidi, M. P. Kutyreva, G. A. Kutyrev, *Herald of Technological University*, **27**, 3, 41-46 (2024).
18. Н. Н. Mukhametova, A. F. Maksimov, M. A. Bochkov, G. A. Kutyrev, E. A. Karalin, H. E. Kharlampidi, *Herald of Technological University*, **27**, 10, 33-38 (2024).
19. Н. Н. Mukhametova, A. F. Maximov, B. R. Yarullin, M. A. Bochkov, G. A. Kutyrev, E. A. Karalin, H. E. Kharlampidi, *Herald of Technological University*, **27**, 7, 33-38 (2024).
20. A. A. Baleb, N. M. Jahed, O. A. Arotiba, S. N. Mailu, N. R. Hendricks, P. G. Baker, E. I. Iwuoha, *J. Electroanal. Chem.*, **652**, 1-2, 18-25 (2011).
21. C. Jana, G. Jayamurugan, R. Ganapathy, P. K. Maiti, N. Jayaraman, A. K. Sood, *J. Chem. Phys.*, **124**, 20, 204719 (2006).
22. R. Esfand, D. A. Tomalia, *Dendrimers and Other Dendritic Polymers*, John Wiley & Sons, 2002, P. 587-604.

23. H. N. Patel, P. M. Patel, *Int. J. Pharm. Bio. Sci.*, **4**, 2, 454-463 (2013).
24. F. Najafi, M. Salami-Kalajahi, H. Roghani-Mamaqani, A. Kahaie-Khosrowshahi, *Colloids Surf. B: Biointerfaces*, **178**, 500–507 (2019).

25. X. Sun, S. Dong, E. Wang, *Macromolecules*, **37**, 19, 7105–7108 (2004).
26. S. Sathiyaraj, K. A. Kumar, A. K. Jailani Shanavas, A. S. Sultan Nasar, *ChemistrySelect*, **2**, 24, 7108-7116 (2017).

© **А. Ф. Максимов** – к.х.н., старший преподаватель кафедры Общей химической технологии (ОХТ), Казанский национальный исследовательский технологический университет (КНИТУ), Казань, Россия, maximov1994aleksey1221@yandex.ru; **М. А. Сажина** – студент кафедры ОХТ, КНИТУ, sazhinama28@mail.ru; **К. В. Холин** – к.х.н., зав. кафедрой Физики, КНИТУ, KholinKV@corp.knrту.ru; **Г. А. Кутырев** – д.х.н., профессор кафедры Технологии переработки полимерных композиционных материалов, КНИТУ, genkutyrev@mail.ru.

© **A. F. Maksimov** – PhD (Chemical Sci.), Senior Lecturer, Department of General Chemical Technology (GCT), Kazan National Research Technological University (KNRTU), Kazan, Russia, maximov1994aleksey1221@yandex.ru; **M. A. Sazhina** – Student, the GCT department, KNRTU, sazhinama28@mail.ru; **K. V. Kholin** – PhD (Chemical Sci.), Head of the Department of Physics, KNRTU, KholinKV@corp.knrту.ru; **G. A. Kutyrev** – Doctor of Science (Chemical Sci.), Professor of the Department of Processing Technology of Polymers and Composite Materials, KNRTU, genkutyrev@mail.ru.

Дата поступления рукописи в редакцию – 01.06.25.

Дата принятия рукописи в печать – 11.06.25.