

Статья поступила в редакцию: 20.08.2026

Статья принята к публикации: 01.08.2026

Статья опубликована: 28.08.2026

УДК 678.745.842

Исследование самопроизвольной полимеризации акриламида в среде этиленгликоля и физико-химических свойств получаемых полиакриламидов

Хамракулов Илхомжон Меликузи угли
свободный соискатель

ООО Ташкентский научно-исследовательский институт химической технологии
Республика Узбекистан, г. Ташкент
E-mail: ilyachemist92@gmail.com

Файзиев Жахонгир Бахромович
д-р техн. наук (DSc)

ООО Ташкентский научно-исследовательский институт химической технологии
Республика Узбекистан, г. Ташкент

Нуркулов Файзулла Нурмунинович
д-р техн. наук (DSc)

ООО Ташкентский научно-исследовательский институт химической технологии
Республика Узбекистан, г. Ташкент

Ахмедов Ориф Жуманазар угли
д-р философии (PhD)

по хим. наукам, ООО Ташкентский научно-исследовательский институт химической
технологии
Республика Узбекистан, г. Ташкент

Spontaneous polymerization of acrylamide in an ethylene glycol medium and physicochemical properties of the obtained polyacrylamides

Khamrakulov Ilkhomjon
Independent Researcher

Tashkent Scientific Research Institute of Chemical Technology LLC
Uzbekistan, Tashkent

Fayziev Jakhongir
doctor of Technical Sciences (DSc)

Tashkent Scientific Research Institute of Chemical Technology LLC
Uzbekistan, Tashkent

Nurkulov Fayzulla
doctor of Technical Sciences, (DSc)

Tashkent Scientific Research Institute of Chemical Technology LLC
Uzbekistan, Tashkent

Akhmedov Orif
doctor of Philosophy (PhD) in Chemistry

Tashkent Scientific Research Institute of Chemical Technology LLC
Uzbekistan, Tashkent

Библиографическое описание: Исследование самопроизвольной полимеризации акриламида в среде этиленгликоля и физико-химических свойств получаемых полиакриламидов // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. Хамракулов И.М.У. [и др.]. 2026. 8(149). URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23265>

Аннотация

В работе изучена самопроизвольная (безинициаторная) полимеризация акриламида в среде этиленгликоля и оценены физико-химические свойства образующегося полиакриламида. Методология включала проведение реакции при массовых соотношениях акриламид: этиленгликоль 2:1, 1:1 и 1:2, температуре 20–25 °С и продолжительности 24 ч без введения внешнего инициатора; выход продукта определяли гравиметрически, содержание остаточного мономера — по массе непрореагировавшего акриламида, строение продукта подтверждали методом ИК-спектроскопии в диапазоне 4000–500 см⁻¹. Установлено, что состав реакционной среды определяет глубину превращения: при соотношении 2:1 выход полиакриламида составил 21,0 %, при 1:1 — 71,0 %, а максимальное значение 93,7 % достигнуто при соотношении 1:2, где доля остаточного мономера снижается до 5–6 %. Полученные продукты хорошо растворимы в воде, не растворяются в этаноле и большинстве органических растворителей, имеют рН среды 6,0–7,0 и плотность 1,28–1,32 г/см³. В ИК-спектре продукта проявляются полосы амидных групп при 1668 и 1614 см⁻¹ и широкая полоса валентных колебаний О–Н и N–Н при 3332 см⁻¹, тогда как полосы винильной группы мономера (1608 и 986 см⁻¹) существенно ослабевают, что подтверждает протекание полимеризации. Практическая значимость работы состоит в возможности получения полиакриламида в мягких условиях без токсичных инициаторов, что важно для производства водорастворимых флокулянтов, загустителей и гидрогелей медико-биологического назначения.

Abstract

This work examines the spontaneous (initiator-free) polymerization of acrylamide in an ethylene glycol medium and evaluates the physicochemical properties of the resulting polyacrylamide. The reaction was carried out at acrylamide: ethylene glycol mass ratios of 2:1, 1:1 and 1:2, at 20–25 °C for 24 h, without any external initiator; the product yield was determined gravimetrically, the residual monomer content was estimated from the mass of unreacted acrylamide, and the structure of the product was confirmed by FTIR spectroscopy in the 4000–500 cm⁻¹ range. It was found that the composition of the reaction medium governs the conversion depth: the polyacrylamide yield was 21.0 % at a 2:1 ratio, 71.0 % at 1:1, and reached a maximum of 93.7 % at 1:2, where the residual monomer content decreases to 5–6 %. The products obtained are readily soluble in water, insoluble in ethanol and in most organic solvents, and have a medium pH of 6.0–7.0 and a density of 1.28–1.32 g/cm³. The FTIR spectrum of the product shows amide bands at 1668 and 1614 cm⁻¹ and a broad O–H and N–H stretching band at 3332 cm⁻¹, whereas the vinyl-group bands of the monomer (1608 and 986 cm⁻¹) are markedly weakened, which confirms that polymerization has occurred. The practical significance of the work lies in the possibility of obtaining polyacrylamide under mild conditions without toxic initiators, which is important for the production of water-soluble flocculants, thickeners and hydrogels for biomedical applications.

Ключевые слова: акриламид, этиленгликоль, полиакриламид, самопроизвольная полимеризация, безинициаторная полимеризация, ИК-спектроскопия, выход реакции.

Keywords: acrylamide, ethylene glycol, polyacrylamide, spontaneous polymerization, initiator-free polymerization, FTIR spectroscopy, reaction yield.

Введение

Полиакриламид и его производные относятся к числу наиболее востребованных водорастворимых полимеров и широко применяются в качестве флокулянтов при водоподготовке и обогащении руд, загустителей буровых растворов, структурообразователей почв, а также в качестве основы гидрогелей медико-биологического назначения. В традиционных технологиях синтеза используются персульфаты, азоинициаторы, фотоинициаторы и редокс-системы, остаточные количества которых и продукты их распада снижают биобезопасность получаемого материала и ограничивают его применение в контакте с живыми тканями и пищевыми средами [8]. Кроме того, фрагменты иницирующих систем ковалентно встраиваются в макромолекулы в виде концевых групп, влияя на механические, биологические и экологические характеристики продукта, что стимулирует разработку методов получения композиционно однородных полимеров [4].

В связи с этим особый интерес представляет способность акриламида полимеризоваться самопроизвольно, без введения внешнего инициатора, в средах многоатомных спиртов. Ранее было показано, что в смеси с глицерином акриламид полимеризуется уже при комнатной температуре [1, с. 1621–1627]. Позднее установлено, что активные центры такого процесса имеют гидропероксидную природу и представляют собой диамагнитные промежуточные частицы, а не обычные свободные радикалы; этот вывод подтверждён совокупностью данных ЭПР, оптической спектроскопии, ингибирования нитроксильным радикалом и иодометрического анализа [2, с. 1777–1785]. Важно, что активация многоатомного спирта может происходить не только под действием γ -излучения, но и под действием обычного дневного света, а образующиеся гидропероксиды способны инициировать побочные радикальные реакции и в других системах, где такие спирты применяются [2, с. 1777–1785].

Существенную роль в подобных процессах играет структура реакционной среды. Показано, что в протонных ионных жидкостях самопроизвольная полимеризация может инициироваться самим повышением концентрации компонентов, без введения инициатора [9, ст. 4265], а в глубоких эвтектических растворителях на основе четвертичных аммониевых соединений формируется ионно-водородно-связанная микросреда, обеспечивающая быстрое образование эластичных и морозостойких эвтектогелей [7, DOI: 10.1021/acs.langmuir.6c02269]. Поведение ионных и полярных компонентов, влияющих на устойчивость и выделение полимерных дисперсий, рассмотрено также в работе [10].

Этиленгликоль, как и глицерин, является многоатомным спиртом, способным к образованию развитой сетки водородных связей и к эффективной сольватации амидных групп, однако он отличается меньшей вязкостью и иным соотношением гидроксильных групп на молекулу, что должно сказываться на диффузионной подвижности растущих цепей. При этом сведения о самопроизвольной полимеризации акриламида именно в среде этиленгликоля в литературе практически отсутствуют, что и определяет актуальность настоящей работы.

Цель работы — установить влияние состава реакционной среды на самопроизвольную полимеризацию акриламида в этиленгликоле и охарактеризовать физико-химические свойства получаемого полиакриламида.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи: 1) провести полимеризацию акриламида в среде этиленгликоля при массовых соотношениях 2:1, 1:1 и 1:2 без введения внешнего инициатора; 2) определить выход продукта и содержание остаточного мономера и установить оптимальное соотношение компонентов; 3) охарактеризовать физико-химические свойства полученных полиакриламидов и подтвердить их строение методом ИК-спектроскопии.

Материалы и методы

В работе использовали акриламид квалификации «ч.д.а.» (ООО «Химмед», Россия) и этиленгликоль квалификации «х.ч.» (Sigma-Aldrich, США). Этиленгликоль использовали без дополнительной очистки, в состоянии поставки производителя. Синтез проводили по методике, ранее апробированной для глицериновой среды [1, с. 1621–1627], без введения внешнего инициатора.

Навеску акриламида растворяли в этиленгликоле при массовых соотношениях акриламид: этиленгликоль 1:1, 1:2 и 2:1. Реакционную смесь выдерживали при температуре 20–25 °С в течение 24 ч в закрытом сосуде при естественном освещении. Образовавшийся полимер осаждали этанолом, отделяли фильтрованием, промывали и сушили до постоянной массы, после чего выход рассчитывали гравиметрически по отношению к исходной массе мономера. Содержание непрореагировавшего акриламида определяли по массе мономера, извлечённого из маточного раствора и промывных жидкостей.

Величину pH реакционной среды измеряли pH-метром при 20–25 °С, плотность продуктов определяли пикнометрическим методом. Растворимость оценивали качественно в воде, этаноле и ряде органических растворителей при комнатной температуре.

ИК-спектры мономера и полученного полимера регистрировали на ИК-Фурье-спектрометре Shimadzu IRAffinity-1S (Shimadzu Corporation, Япония) в диапазоне 4000–500 см⁻¹. Образцы готовили в виде таблеток с KBr спектральной чистоты. Все эксперименты выполняли в трёх параллельных повторностях. В таблицах приведены средние значения результатов. Относительная погрешность определения выхода полимера не превышала ±2,0 %.

Результаты и обсуждение

Результаты самопроизвольной полимеризации акриламида в среде этиленгликоля и физико-химические свойства полученных полиакриламидов приведены в таблице 1.

Таблица 1.

Самопроизвольная полимеризация акриламида в среде этиленгликоля и физико-химические свойства получаемых полиакриламидов

№	Показатели	Соотношение 1:1	Соотношение 1:2	Соотношение 2:1
1	Температура реакции, °С	20–25	20–25	20–25
2	Продолжительность реакции, ч	24	24	24
3	Выход реакции, %	71,0	93,7	21,0
4	Остаточный акриламид, %	25–30	5–6	75–80
5	pH среды	6,0–7,0	6,5–7,0	6,5–7,0

№	Показатели	Соотношение 1:1	Соотношение 1:2	Соотношение 2:1
6	Плотность, г/см ³	1,28–1,30	1,28–1,32	1,30–1,32
7	Растворимость в воде	хорошо растворим	хорошо растворим	хорошо растворим
8	Растворимость в органических растворителях	не растворяется	не растворяется	не растворяется

Примечание. Молекулярная масса полученных полиакриламидов в настоящей работе не определялась; вискозиметрическое и ГПХ-исследование образцов планируется на следующем этапе работы.

Как следует из представленных данных, глубина превращения существенно зависит от содержания этиленгликоля в реакционной смеси (таблица 1).

При соотношении 2:1 выход продукта составляет лишь 21,0 %. В этом случае содержание мономера относительно велико, а количества растворителя недостаточно для полной сольватации молекул акриламида: возникает локальное загущение среды, ограничивающее подвижность растущих цепей. Поэтому даже при образовании активных центров их эффективное взаимодействие с молекулами мономера затруднено, и глубина полимеризации остаётся низкой. При эквимассовом соотношении 1:1 выход возрастает до 71,0 %, а максимальное значение 93,7 % достигается при соотношении 1:2. В последнем случае этиленгликоль обеспечивает более полное сольватационное окружение молекул акриламида, усиление водородных связей с амидными группами и формирование благоприятных диффузионных условий для роста полимерных цепей. Таким образом, для полимеризации акриламида в среде этиленгликоля при 20–25 °С и продолжительности 24 ч оптимальным следует считать массовое соотношение 1:2.

Полученный вывод подтверждается и данными по содержанию остаточного мономера (таблица 1): рост выхода полимера сопровождается закономерным снижением доли непрореагировавшего акриламида с 75–80 % при соотношении 2:1 до 5–6 % при соотношении 1:2. Это указывает на то, что увеличение доли этиленгликоля повышает не только выход, но и полноту конверсии мономера, что важно с точки зрения токсичности остаточного акриламида в целевом продукте [3].

Строение полученного продукта подтверждено методом ИК-спектроскопии (рисунок 1). В спектре полимера сохраняется интенсивное поглощение амидного фрагмента: полосы при 1668 и 1614 см⁻¹ отвечают валентным колебаниям С=О (амид I) и деформационным колебаниям N–H (амид II). Широкая полоса с максимумом около 3332 см⁻¹ соответствует валентным колебаниям групп О–Н и N–H и свидетельствует о развитой системе водородных связей в образце. Аналогичные полосы амидных групп характерны для полиакриламида, получаемого радикальной полимеризацией [5].

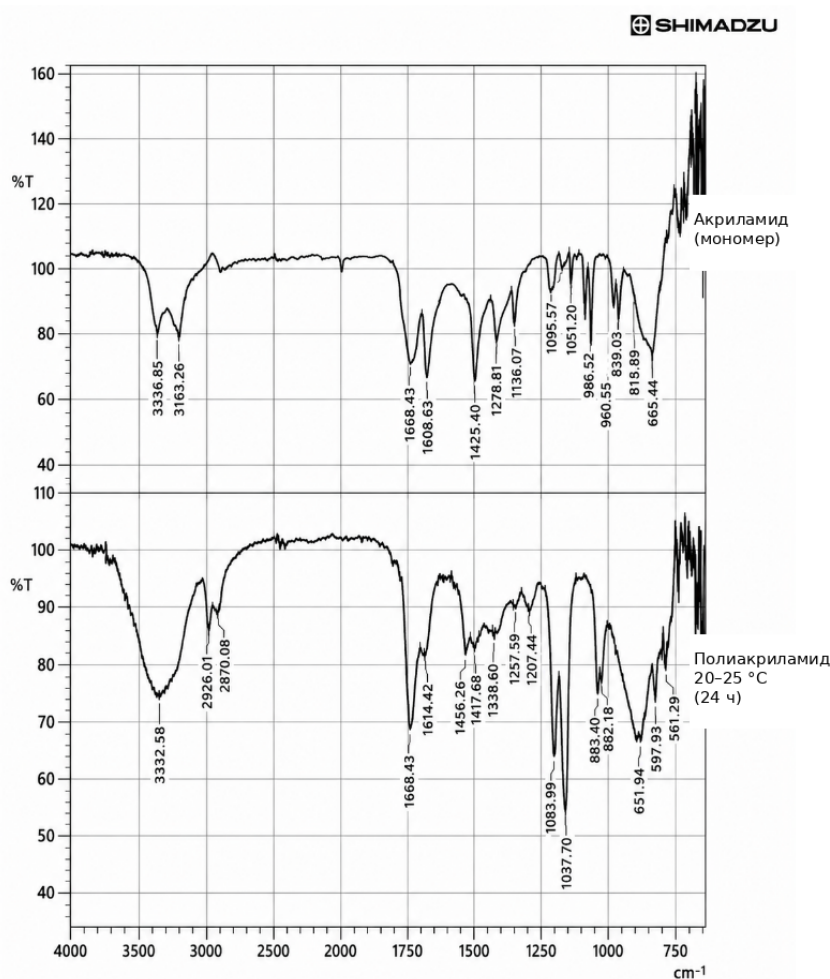


Рисунок 1. ИК-спектры исходного акриламида (верхняя кривая) и полиакриламида, полученного самопроизвольной полимеризацией в среде этиленгликоля (нижняя кривая; 20–25 °С, 24 ч)

Сопоставление спектров мономера и полимера показывает наиболее существенные изменения в области колебаний винильной группы. В спектре исходного акриламида чётко проявляются полосы при 1608 см⁻¹ (валентные колебания C=C) и при 986 и 960 см⁻¹ (внеплоскостные деформационные колебания =CH₂), тогда как в спектре продукта их интенсивность резко снижается, а в области 2926 и 2870 см⁻¹ появляются полосы валентных колебаний C–H насыщенных метиленовых и метиновых групп основной цепи. Совокупность этих изменений однозначно указывает на раскрытие двойной связи и образование полимерной цепи. Полосы в области 1084–1037 см⁻¹ могут быть отнесены к валентным колебаниям C–O этиленгликоля, что указывает на его участие в формировании межмолекулярных взаимодействий в полимерной матрице; окончательное разграничение остаточного растворителя и химически связанных фрагментов требует дополнительных исследований методами ЯМР и элементного анализа.

Полученные результаты согласуются с представлениями о гидропероксидной природе активных центров в системах «многоатомный спирт — акриламид» [2, с. 1777–1785] и показывают, что этиленгликоль, подобно глицерину, способен обеспечивать безинициаторное протекание процесса. При этом достигнутый выход 93,7 % за 24 ч при комнатной температуре сопоставим с показателями, характерными для иницируемых систем [6], что делает рассматриваемый подход практически привлекательным.

Заключение

1. Показана принципиальная возможность самопроизвольной полимеризации акриламида в среде этиленгликоля при 20–25 °С без введения внешнего инициатора.
2. Установлено, что выход полиакриламида определяется массовым соотношением акриламид: этиленгликоль и составляет 21,0 % при соотношении 2:1, 71,0 % при 1:1 и 93,7 % при 1:2; оптимальным при продолжительности 24 ч является соотношение 1:2, при котором доля остаточного мономера снижается до 5–6 %.
3. Полученные полиакриламиды хорошо растворимы в воде, не растворяются в этаноле и большинстве органических растворителей, характеризуются рН среды 6,0–7,0 и плотностью 1,28–1,32 г/см³.
4. Данные ИК-спектроскопии подтверждают образование полиакриламидной структуры: сохраняются полосы амидных групп при 1668 и 1614 см⁻¹, появляются полосы С–Н насыщенных групп при 2926 и 2870 см⁻¹ и существенно ослабевают полосы винильной группы мономера.
5. Практическая значимость результатов состоит в возможности получения полиакриламида в мягких условиях без токсичных инициаторов. Дальнейшие исследования будут направлены на изучение кинетики процесса, определение молекулярной массы и молекулярно-массового распределения продуктов, а также на оценку их флокулирующей способности.

Список литературы

1. Большаков А.И., Кирюхин Д.П. Спонтанная полимеризация акриламида в смеси с глицерином // Высокомолекулярные соединения. Серия А. – 2007. – Т. 49, № 9.
2. Большаков А.И., Кузина С.И., Кирюхин Д.П. Активные центры и особенности спонтанной полимеризации акриламида в глицерине // Высокомолекулярные соединения. Серия А. – 2008. – Т. 50, № 10.
3. Braun O., Coquery C., Kieffer J., Blondel F., Favero C., Besset C., Mesnager J., Voelker F., Delorme C., Matioszek D. Spotlight on the Life Cycle of Acrylamide-Based Polymers Supporting Reductions in Environmental Footprint: Review and Recent Advances // *Molecules*. – 2021. – Т. 27, № 1. – DOI: 10.3390/molecules27010042.
4. Huang W., Zhang X., Chen J., Zhang B., Chen B., Zhang G. Organic Photocatalyzed Polyacrylamide without Heterogeneous End Groups: A Mechanistic Study // *ACS Catalysis*. – 2023. – Т. 13, № 4. – P. 2542–2546. – DOI: 10.1021/acscatal.2c05972.
5. Klaus M.V.X., Gutierrez A.M., Hilt J.Z. Development of Poly(acrylamide)-Based Hydrogel Composites with Powdered Activated Carbon for Controlled Sorption of PFOA and PFOS in Aqueous Systems // *Polymers*. – 2023. – Т. 15, № 22. – DOI: 10.3390/polym15224384.
6. Mil-Martínez R., Gómez-López A., Escandón J.P., Jimenez E.M., Martínez-Suástegui L., Vargas R.O. Scale-Up and Control of the Acrylamide Polymerization Process in Solution // *Processes*. – 2024. – Т. 12, № 8. – DOI: 10.3390/pr12081624.

7. Qin Ch., Li Zh., Liu H., Kan X., Zhang Sh., Wu N., Xu W. An ultrasoft initiator-free eutectogel for strain sensing and gesture recognition assisted by machine learning // *Langmuir*. – 2026. – DOI: 10.1021/acs.langmuir.6c02269.
8. Xiang S., Zhou Z., Kalantar-Zadeh K., Ma B., Bianco A., Ménard-Moyon C. Safe polyacrylamide-based hydrogels with low monomer content achieved by using liquid metal nanoparticles or MoS₂ nanosheets as efficient initiators // *Chemical Engineering Journal*. – 2026. – T. 534. – DOI: 10.1016/j.cej.2026.174942.
9. Zhang J., Zhou X., Hu Q., Zhou K., Zhang Y., Dong S., Zhao G., Zhang S. Concentration-induced spontaneous polymerization of protic ionic liquids for efficient in situ adhesion // *Nature Communications*. – 2024. – T. 4265. – DOI: 10.1038/s41467-024-48561-1.
10. Zhou D., Yan H., Yang Y., Shu X., Chen L., Li C., Ran Q. Investigation of the Effect of Particle Surface Charge and Dispersion Stability on Latex Behavior in Cement Using Non-Ionic and Traditional Latexes // *Materials*. – 2022. – T. 15, № 17. – DOI: 10.3390/ma15176145.

References

1. Bolshakov A.I., Kiryukhin D.P. [Spontaneous polymerization of acrylamide in a mixture with glycerol]. *Vysokomolekulyarnye soedineniya. Seriya A*, 2007, vol. 49, no. 9, P. 1621–1627. (In Russ.)
2. Bolshakov A.I., Kuzina S.I., Kiryukhin D.P. [Active centers and features of spontaneous polymerization of acrylamide in glycerol]. *Vysokomolekulyarnye soedineniya. Seriya A*, 2008, vol. 50, no. 10, P. 1777–1785. (In Russ.)
3. Braun O., Coquery C., Kieffer J., Blondel F., Favero C., Besset C., Mesnager J., Voelker F., Delorme C., Matioszek D. Spotlight on the Life Cycle of Acrylamide-Based Polymers Supporting Reductions in Environmental Footprint: Review and Recent Advances. *Molecules*, 2021, vol. 27, no. 1, art. 42. DOI: 10.3390/molecules27010042.
4. Huang W., Zhang X., Chen J., Zhang B., Chen B., Zhang G. Organic Photocatalyzed Polyacrylamide without Heterogeneous End Groups: A Mechanistic Study. *ACS Catalysis*, 2023, vol. 13, no. 4, P. 2542–2546. DOI: 10.1021/acscatal.2c05972.
5. Klaus M.V.X., Gutierrez A.M., Hilt J.Z. Development of Poly(acrylamide)-Based Hydrogel Composites with Powdered Activated Carbon for Controlled Sorption of PFOA and PFOS in Aqueous Systems. *Polymers*, 2023, vol. 15, no. 22, art. 4384. DOI: 10.3390/polym15224384.
6. Mil-Martínez R., Gómez-López A., Escandón J.P., Jimenez E.M., Martínez-Suástegui L., Vargas R.O. Scale-Up and Control of the Acrylamide Polymerization Process in Solution. *Processes*, 2024, vol. 12, no. 8, art. 1624. DOI: 10.3390/pr12081624.
7. Qin Ch., Li Zh., Liu H., Kan X., Zhang Sh., Wu N., Xu W. An ultrasoft initiator-free eutectogel for strain sensing and gesture recognition assisted by machine learning. *Langmuir*. – 2026. – DOI: 10.1021/acs.langmuir.6c02269.

8. Xiang S., Zhou Z., Kalantar-Zadeh K., Ma B., Bianco A., Ménard-Moyon C. Safe polyacrylamide-based hydrogels with low monomer content achieved by using liquid metal nanoparticles or MoS₂ nanosheets as efficient initiators. *Chemical Engineering Journal*, 2026, vol. 534, art. 174942. DOI: 10.1016/j.cej.2026.174942.
9. Zhang J., Zhou X., Hu Q., Zhou K., Zhang Y., Dong S., Zhao G., Zhang S. Concentration-induced spontaneous polymerization of protic ionic liquids for efficient in situ adhesion. *Nature Communications*, 2024, vol. 15, art. 4265. DOI: 10.1038/s41467-024-48561-1.
10. Zhou D., Yan H., Yang Y., Shu X., Chen L., Li C., Ran Q. Investigation of the Effect of Particle Surface Charge and Dispersion Stability on Latex Behavior in Cement Using Non-Ionic and Traditional Latexes. *Materials*, 2022, vol. 15, no. 17, art. 6145. DOI: 10.3390/ma15176145.