

DOI: 10.15593/2224-9400/2022.4.07

Научная статья

УДК 544.777: 678.744.329

**Н.С. Воронина, И.И. Лебедева, А.И. Нечаев,
В.А. Вальцифер, В.Н. Стрельников**

Институт технической химии
Уральского отделения Российской академии наук –
филиал ФГБУН Пермского федерального
исследовательского центра УрО РАН, Пермь, Россия

ТЕРМОСТАБИЛЬНОСТЬ ТРОЙНЫХ СОПОЛИМЕРОВ АКРИАМИДА, АКРИЛОНИТРИЛА И 2-АКРИАМИДО-2-МЕТИЛПРОПАНСУЛЬФОНОВОЙ КИСЛОТЫ В РАЗБАВЛЕННЫХ РАСТВОРАХ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ pH СРЕДЫ

Методом радикальной сополимеризации в водном растворе синтезирован терполимер акриламида (АА), акрилонитрила (АН) и натриевой соли 2-акриламидо-2-метилпропансульфокислоты (АМПСNa) АА-АН-АМПСNa с соотношением звеньев [72]:[10]:[18] мол.%. Методами ИК-фурье, ¹H ЯМР и ¹³C ЯМР спектроскопии исследовано влияние условий термического воздействия на разбавленные растворы терполимера, таких как температура, длительность и кислотность среды, на химический состав и структуру его макромолекул. Показано, что термогидролизу в первую очередь подвергаются звенья АА и АН акрилатного терполимера. При температуре воздействия 180 °С заметное изменение состава терполимера наблюдается после изотермической выдержки в течение 5 ч, при температуре 200 °С – 3 ч во всем исследуемом диапазоне pH, при этом состав продуктов деструкции приближается к АК-АМПСNa. В условиях длительного высокотемпературного воздействия (5 ч при T = 200 °С) на растворы терполимера также происходит частичный гидролиз звеньев АМПСNa. На основании данных по изменению характеристической вязкости растворов продуктов деструкции терполимера можно предположить, что в условиях термического воздействия также происходит частичная термодеструкция основной полимерной цепи, которая усиливается с ростом температуры воздействия до 200 °С и продолжительности до 5 ч.

Ключевые слова: акрилатные терполимеры, полиакриламид, термическое воздействие, гидролиз растворов полимеров, деструкция растворов полимеров, макромолекулярный клубок, характеристическая вязкость.

**N.S. Voronina, I.I. Lebedeva, A.I. Nechaev,
V.A. Valtsifer, V.N. Strelnikov**

Institute of Technical Chemistry Ural Branch of the Russian Academy
of Sciences – branch of Perm Federal Research Center of the Ural Branch
of the Russian Academy of Sciences, Perm, Russian Federation

**THERMOSTABILITY OF TRIPLE COPOLYMERS
OF ACRYLAMIDE, ACRYLONITRILE,
AND 2-ACRYLAMIDO-2-METHYLPROPANESULFONIC
ACID IN DILUTE SOLUTIONS AT DIFFERENT pH MEDIUM**

A terpolymer of acrylamide (AA), acrylonitrile (AN), and sodium salt of 2-acrylamido-2-methylpropanesulfonic acid (AMPSNa) AA-AN-AMPSNa with the ratio of units [72]:[10]:[18] mol.%. IR-Fourier, ¹H NMR, and ¹³C NMR spectroscopy methods were used to study the effect of thermal treatment conditions on dilute terpolymer solutions, such as temperature, duration, and acidity of the medium, on the chemical composition and structure of its macromolecules. It has been shown that the AA and AN units of the acrylate terpolymer are primarily subjected to thermal hydrolysis. At an exposure temperature of 180 °C, a noticeable change in the composition of the terpolymer is observed after isothermal holding for 5 h, at a temperature of 200 °C – 3 h in the entire pH range under study, while the composition of degradation products approaches AA-AMPSNa. Under conditions of long-term high-temperature exposure (5 h at T = 200 °C), terpolymer solutions also undergo partial hydrolysis of AMPSNa units. Based on the data on the change in the intrinsic viscosity of solutions of terpolymer degradation products, it can be assumed that under thermal exposure conditions, partial thermal destruction of the main polymer chain also occurs, which increases with exposure temperature to 200 °C and duration up to 5h.

Keywords: *acrylate terpolymers, polyacrylamide, thermal treatment, hydrolysis of polymer solutions, degradation of polymer solutions, macromolecular coil, intrinsic viscosity*

В настоящее время происходит увеличение доли трудно извлекаемых запасов нефти при добыче [1], поэтому активно развивается бурение глубоких и сверхглубоких поисково-разведочных и эксплуатационных нефтегазовых скважин в сложных горно-геологических условиях [2]. Данные условия бурения характеризуются в том числе и высокими температурами в призабойной зоне от 90–160 °C, что сказывается на рабочих характеристиках всех компонентов буровых растворов.

Применение полиакриламида (ПАА), а также частично гидролизованного ПАА в условиях высоких температур (≥ 90 °C) ограничено вследствие его деструкции [3].

Более стойкими к условиям температурного воздействия являются сополимеры акриламида с объемными сульфонатными заместителями в боковой цепи [4, 5]. В работе [6] показано, что присутствие 2-акриламидо-2-метилпропансульфоновой кислоты (АМПСК) в основ-

ной цепи полимера повышает эффективность ПАА в качестве агента снижения гидродинамического сопротивления турбулентного потока в капилляре. В частности, сополимер АА-АМПСК, содержащий 15 % АМПСК, приводит к самым низким значениям коэффициента трения Фаннинга и наибольшему значению эффекта снижения гидродинамического сопротивления.

Широко используемым сульфонатным реагентом (сополимер АА и АМПСК) является ASP-820, выпускаемый фирмой Nalco (США). Лабораторные исследования влияния минерализации и температуры на эффективность снижения гидродинамического сопротивления противотурбулентными добавками ASP-820 и ASP-700 [7] показали, что в интервале температур 22–56 °С и минерализации 2,0–3,4 мас.% при оптимальной концентрации полимеров 0,07 об.% снижение гидродинамического сопротивления составляет 30–80 %, причем в условиях повышенных температур и минерализации лучшие свойства показали сополимеры, содержащие в своем составе большее количество мономера АМПСК.

Исследования термических превращений в окислительной воздушной среде сополимеров акрилата натрия (АКNa) с 2-акриламидо-2-метилпропансульфонатом натрия (АМПСNa) в диапазоне от 20 до 500 °С установили, что все сополимеры характеризуются устойчивостью к термическому воздействию до 56 °С, при этом в области 225–250 °С термическая стабильность возрастает с увеличением содержания звеньев АМПСNa в сополимере [8]. Аналогичные данные получены для сополимеров акриламида и 2-акриламидо-2-метилпропансульфоукислоты [9]. При этом в приведенных исследованиях отсутствуют данные по поведению сополимеров при повышенных температурах в водной среде.

Ранее авторами установлен оптимальный состав терполимера АА-АН-АМПСNa, обеспечивающий его устойчивость к солям кальция после гидротермальной обработки при 180 °С в течение 5 ч [10, 11].

Целью данной работы являлось установление закономерностей деградации тройного сополимера акриламида, акрилонитрила и 2-акриламидо-2-метилпропансульфоукислоты в разбавленных растворах различных рН при температурах 180–200 °С.

Экспериментальная часть. В качестве мономеров использовали акриламид (АА) (+98%, Alfa Aesar), 2-акриламидо-2-метилпропансульфоукислоту (АМПСК) (98 %, Alfa Aesar) и нитрил акриловой кислоты (АН) (99+%, Alfa Aesar), который предварительно очищали от ингибитора перегонкой, выделяя фракцию с $T_{\text{кип}} = 78 \text{ }^\circ\text{C}$, $n = 1,3910$. Натрия гидроксид (analytically pure, Ecos-1), персульфат калия (ПК) ($\geq 99,0 \%$, Sigma-

Aldrich) и сульфит натрия (CH) ($\geq 98,0$ %, Sigma-Aldrich) использовали без дополнительной очистки. Во всех экспериментах была использована бидистиллированная вода с удельной проводимостью не более $1,6 \text{ мкСм} \cdot \text{см}^{-1}$.

Терполимер АА, АН и АМПСNa, обозначаемый далее АА-АН-АМПСNa, получали радикальной сополимеризацией в водном растворе по разработанной авторами методике [10]. Исходное мольное соотношение мономеров составляло $[\text{AA}]:[\text{AN}]:[\text{АМПСК}] = 65:15:20$ (мол.%). Суммарная концентрация мономеров в растворе составляла $3,2 \text{ моль} \cdot \text{л}^{-1}$. Полученные сополимеры очищали от остаточных мономеров осаждением из водных растворов в десятикратный избыток ацетона, промывали ацетоном и далее выдерживали в вакуум-сушильном шкафу при 60 °С до постоянной массы. По данным элементного анализа рассчитано, что мольное соотношение звеньев мономеров в синтезированном полимере составляет $[\text{AA}]:[\text{AN}]:[\text{АМПСК}] = 72:10:18$ (мол.%).

Исследование термогидростабильности полученного терполимера АА-АН-АМПСNa в разбавленных растворах с различными значениями рН среды проводили для 1 % растворов терполимера в воде (рН = 7,45), а также в буферах с рН, равным 3,56 и 6,86. Для этого раствор терполимера помещали в открытом стеклянном бюксе в стальной автоклав, оснащенный герметичной тefлоновой ячейкой, и термостатировали при T , равной 180 и 200 °С в течение 0,5-5 ч. Полученные после термообработки продукты деструкции терполимера выделяли из раствора осаждением в десятикратный избыток ацетона, промывали ацетоном и этанолом, затем выдерживали в вакуум-сушильном шкафу при 60 °С до постоянной массы.

Состав терполимера АА-АН-АМПСNa и продуктов его деструкции определяли по результатам ИК-фурье-спектроскопии и ^1H ЯМР и ^{13}C ЯМР спектроскопии.

ИК-спектры образцов были сняты в диапазоне $400\text{--}4000 \text{ см}^{-1}$ на спектрометре IFS 66/SBruker в режиме НПВО. Спектры ^1H ЯМР и ^{13}C ЯМР образцов регистрировали на спектрометре Avance III HD 400 (Bruker), рабочая частота 300 и 75,5 МГц соответственно. Спектры ^{13}C ЯМР регистрировали с широкополосным подавлением по протонам и в режиме JMOD. В качестве растворителя использовали дейтериевую воду D_2O . В качестве образцов для ЯМР спектроскопии были использованы 5 % растворы терполимера и продуктов его деструкции в D_2O . Отнесение сигналов групп в спектрах терполимеров выполнено на основании справочных данных.

Характеристическую вязкость полимера $[\eta]$ определяли методом капиллярной вискозиметрии, используя стеклянный вискозиметр ВПЖ-1 ($d_k = 0,54$ мм), при $T = 30$ °С в 0,5 М растворе NaCl. На основании измерений строили линейные концентрационные зависимости $\eta_{уд}/C_p = f(C_p)$, где C_p – концентрация полимера. При экстраполяции полученных прямых к нулевой концентрации находили характеристическую вязкость полимера: $[\eta] = \lim (\eta_{уд}/C_p)$, при $C_p \rightarrow 0$.

Результаты и их обсуждение. Механизм разрушения терполимера АА-АН-АМПСNa в условиях термического воздействия на его растворы связан с изменением химической структуры макромолекул, обусловленным процессами термогидролиза и термодеструкции.

Изменение химического состава акрилатного терполимера в условиях термического воздействия на его растворы происходит вследствие протекания гидролиза функциональных групп по реакциям, представленным на рис. 1.

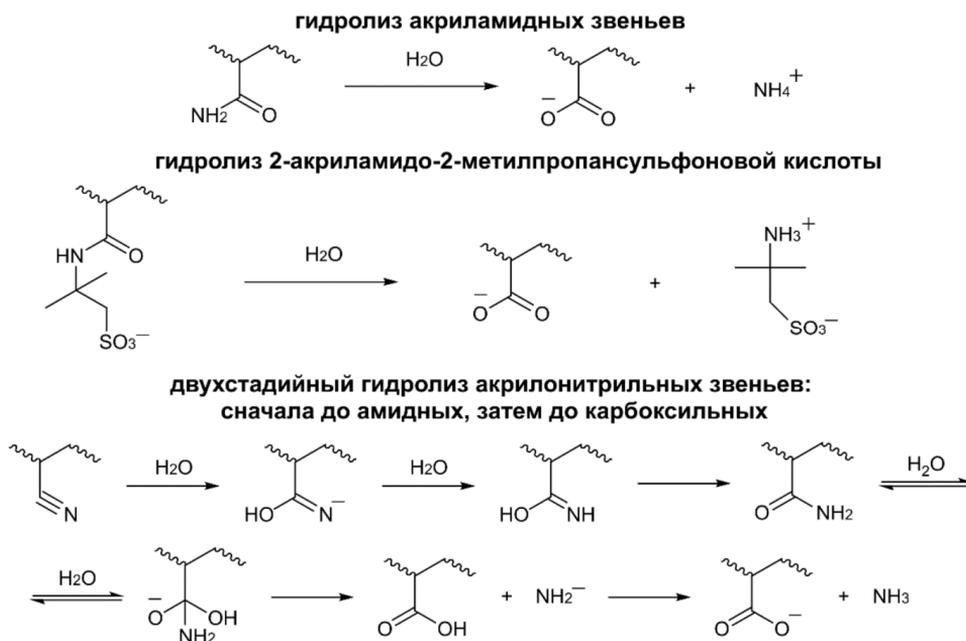


Рис. 1. Химические реакции гидролиза звеньев терполимера АА-АН-АМПСNa

Как видно из ИК-спектра на рис. 2, в исходном терполимере наблюдаются характерные полосы поглощения звеньев акриламида АА, акрилонитрила АН и 2-акриламидо-2-метилпропансульфоновой кислоты АМПСNa: п.п. при 1672 см^{-1} – валентные колебания карбонильной группы $\text{C}=\text{O}$ (амидная полоса I); п.п. при 3352 и 3207 см^{-1} – валентные

асимметричные и симметричные колебания группы N–H первичного амида; п.п. при 1617 см^{-1} – деформационные колебания N–H первичного амида (амидная полоса II); п.п. при 1547 см^{-1} – деформационные колебания N–H вторичного амида (амидная полоса II); п.п. при 1416 см^{-1} – колебания группы C–N; п.п. при 771 см^{-1} – деформационные внеплоскостные колебания N–H (амид V); C≡N колебания в акрилонитриле при 2245 см^{-1} ; п.п. при 1188 и 1043 см^{-1} – валентные симметричные и асимметричные колебания S=O; п.п. при 625 см^{-1} – валентные колебания S–O; п.п. при 1217 см^{-1} валентные колебания SO₂; п.п. при $\sim 3500\text{ см}^{-1}$ – валентные колебания OH групп; п.п. при 2933 см^{-1} – валентные колебания –CH₃. Эффективность реакций сополимеризации подтверждается отсутствием п.п. винильных групп при ~ 3100 и 980 см^{-1} [12, 13].

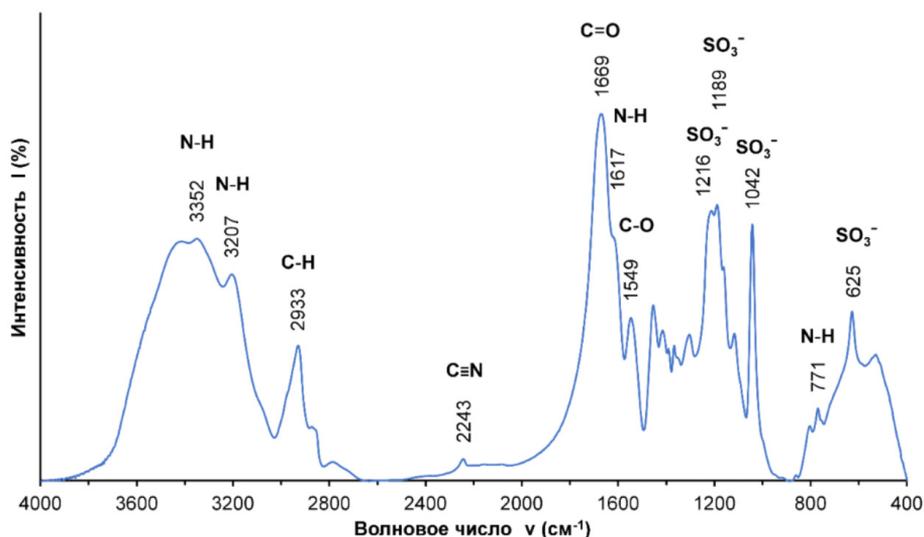


Рис. 2. ИК-спектр исходного терполимера АА-АН-АМРСNa

Из ИК спектров продуктов деструкции, полученных методом НПВО (рис. 3), видно, что при температуре $180\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение $0,5\text{--}3\text{ ч}$ во всем диапазоне рН наблюдается только изменение интенсивности п.п. и их соотношения. Так, у п.п. при 1670 см^{-1} появляется плечо при п.п. 1720 см^{-1} , отвечающее связи C=O карбоксильной группы. Наблюдается рост интенсивности п.п. при 1552 см^{-1} , относящейся к деформационным колебаниям связи C=O карбоксилат аниона, относительно п.п. 1667 см^{-1} (C=O, амид I), снижается интенсивность п.п. при 1617 и 3207 см^{-1} (N–H, амид II) по отношению к п.п. 1670 см^{-1} (C=O) и п.п. 2938 см^{-1} (C–H), что обусловлено превращением амидной группы в карбоксильную в процессе термогидролиза.

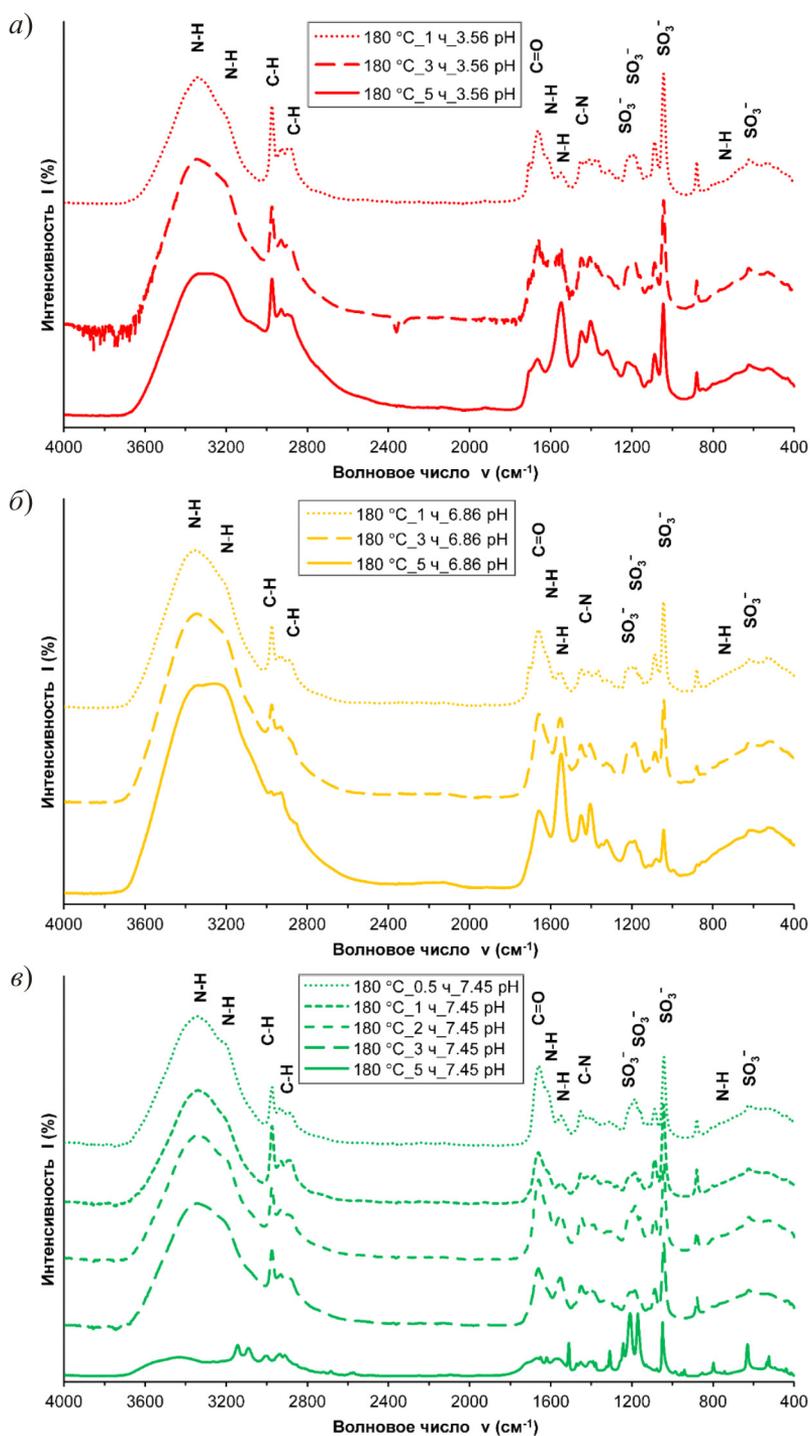


Рис. 3. ИК-спектр НПВО исходного акрилатного терполимера АА-АН-АМПСНа после гидротермального воздействия при 180°C в различном диапазоне значений рН среды: а – 3,56 рН; б – 6,86 рН; в – 7,45 рН

В ИК-спектрах, полученных методом НПВО, слабо разрешены п.п. в диапазоне $2200\text{--}2300\text{ см}^{-1}$, характерные для нитрильных групп, что обусловлено ограничениями методики эксперимента (ИК-спектры сняты для свежесаженных терполимеров в режиме НПВО).

При увеличении продолжительности воздействия до 5 ч во всем интервале рН наблюдается существенное изменение ИК-спектра терполимера. Пропадает п.п., характерная для амидной связи в звеньях АА при 1617 см^{-1} (N–H, амид II). Также происходит смещение п.п. C=O при 1672 см^{-1} в область более высоких волновых чисел, что говорит о полном превращении амидной группы в карбоксильную.

При температуре воздействия $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ заметные изменения в ИК-спектрах, обусловленные термогидролизом АА звеньев терполимера, наблюдаются уже после изотермической выдержки в течение 3 ч во всем диапазоне рН (рис. 4).

Кроме того, в результате усиления термогидролиза при повышении продолжительности и температуры гидротермального воздействия частично гидролизуются звенья АМПСNa. В ИК-спектрах это проявляется как уменьшение относительной интенсивности п.п. сульфогрупп ($627, 1042, 1187$ и 1212 см^{-1}). Удаление объемного бокового сульфонатного заместителя может приводить к изменению пространственной структуры макромолекул терполимера.

Как видно из ^1H ЯМР спектров (рис. 5), с увеличением продолжительности воздействия с 1 до 5 ч во всем диапазоне рН заметно уменьшаются интенсивности пиков в области химсдвигов сигналов протонов NH_2 группы АА при $\delta 6,69\text{--}7,15$, протонов --CH-- в звеньях АН в области $\delta 2,61\text{--}2,9$ м.д., что свидетельствует о гидролизе амидных и нитрильных групп в сополимере в условиях гидротермального воздействия при $T = 180\text{ }^{\circ}\text{C}$. Сигналы метиленовых протонов звена $\text{C--CH}_2\text{--S}$ при $\delta 3,34$ м.д. сохраняются, что подтверждает термогидростабильность звеньев АМПСNa терполимера в данных условиях [14].

В ^{13}C ЯМР спектрах терполимеров после гидротермального воздействия при $T = 180\text{ }^{\circ}\text{C}$ (рис. 6) отсутствуют пики при 123 м.д., отвечающие углероду нитрильной группы. Сигналы четвертичного углерода при 51,70 м.д., метиленовой группы, связанной с SO_3 , при 60,11 м.д. и углерода метильных групп звена АМПСNa при 25,73 м.д. сохраняются. Изменения наблюдаются в области сигналов углерода карбонильной группы. При увеличении продолжительности гидротермального воздействия до 3 ч заметно уменьшается интенсивность сигнала углерода карбонильной группы АА при 182 м.д., появляется сигнал углерода карбонильной группы АК при 185 м.д.

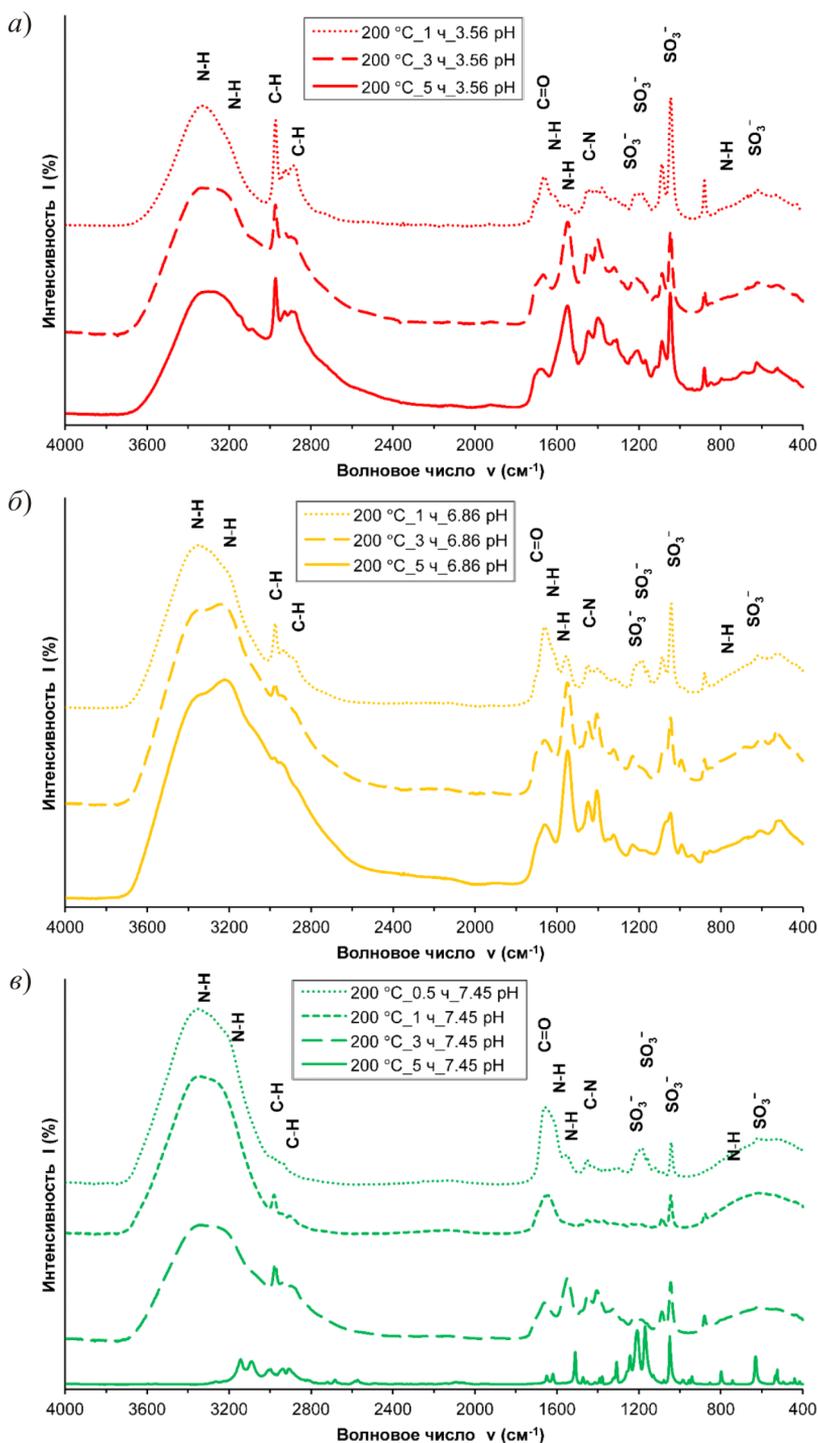


Рис. 4. ИК-спектр НПВО исходного акрилатного терполимера АА-АН-АМПСNa после гидротермального воздействия при 200 °С в различном диапазоне значений рН среды: а – 3,56 рН; б – 6,86 рН; в – 7,45 рН

Сигнал углерода карбонильной группы АМПСNa при 178 м.д. сохраняется. После 5 ч гидротермального воздействия во всем диапазоне рН в ^{13}C ЯМР спектрах терполимеров практически исчезает сигнал углерода карбонильной группы АА при 182 м.д., что обусловлено превращением амидной группы в карбоксильную в процессе термогидролиза. Состав сополимера приближается к АК-АМПСNa [15].

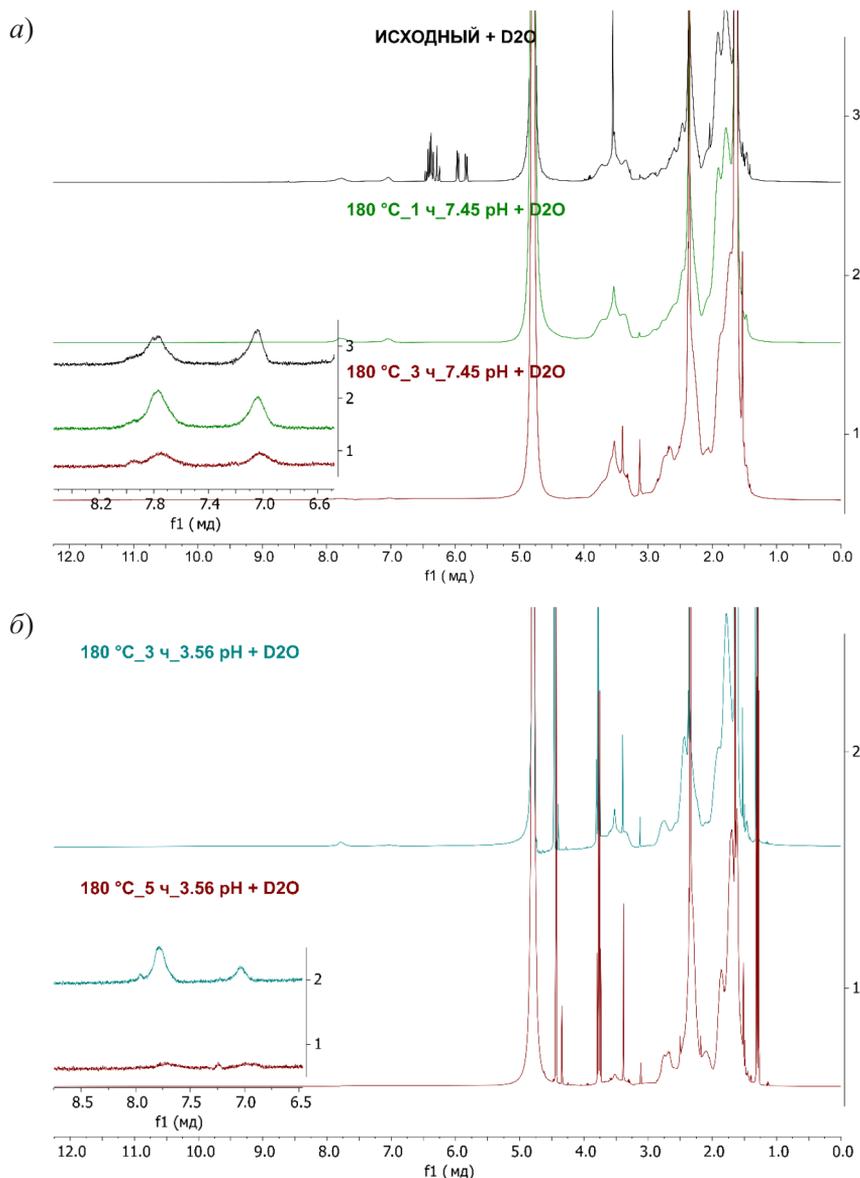


Рис. 5. ^1H ЯМР спектры акрилатного терполимера АА-АН-АМПСNa до и после гидротермального воздействия: *a* – при температуре 180 °С и рН 7,45 в течение 1, 3, 5 ч; *б* – при температуре 180 °С и рН 3,56 в течение 3, 5 ч

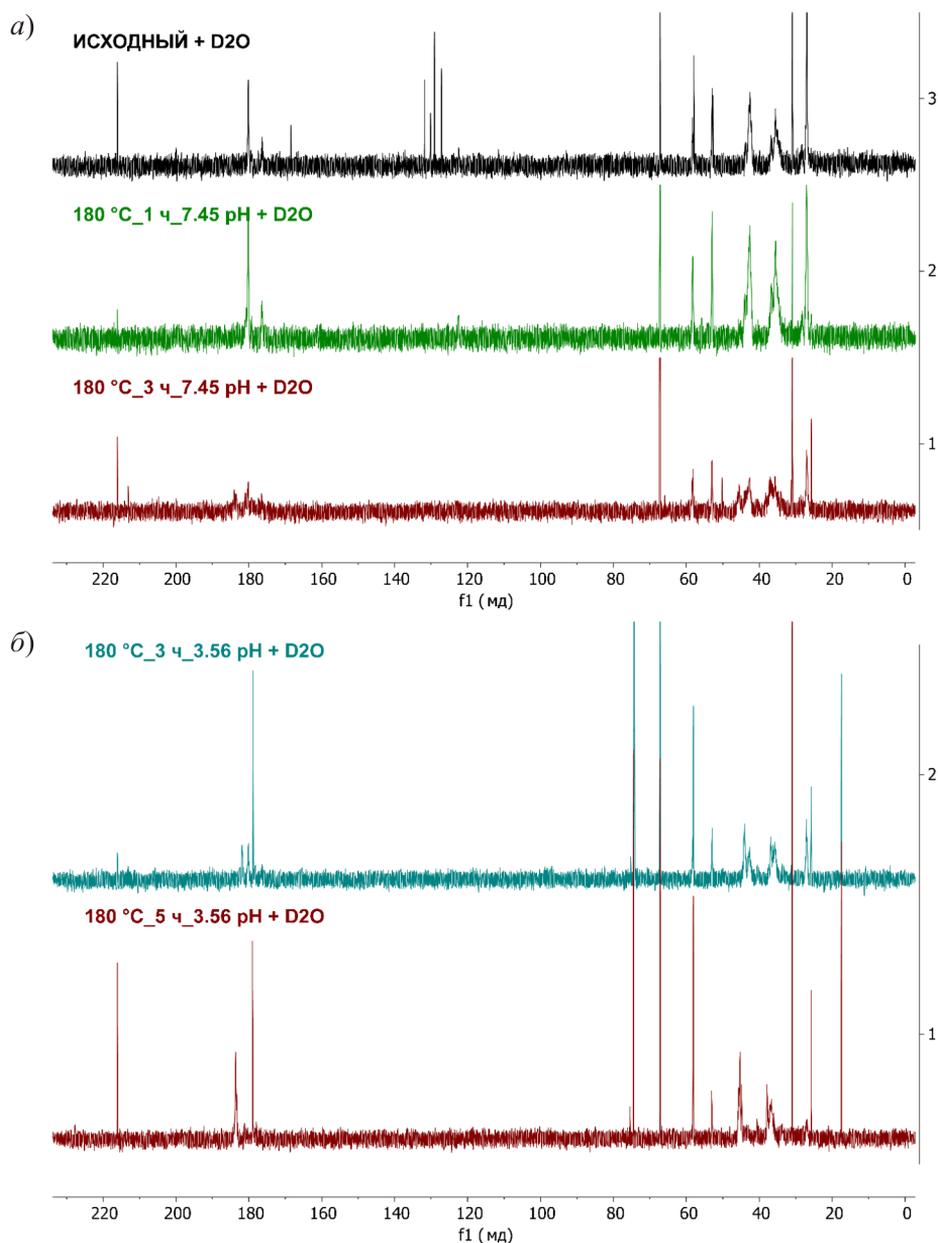


Рис. 6. ^{13}C ЯМР спектр акрилатного терполимера АА-АН-АМПСNa до и после гидротермального воздействия: *a* – при температуре 180 °C и рН 7,45 в течение 1, 3 ч; *б* – при температуре 180 °C и рН 3,56 в течение 3, 5 ч

Из анализа зависимостей характеристической вязкости раствора $[\eta]$ от времени следует, что уменьшение вязкости разбавленных растворов терполимера при $T = 180$ и 200 °C является необратимым и общим процессом во всем исследуемом диапазоне рН. Эксперименталь-

ные данные показывают, что скорость деструкции растет с увеличением температуры. Характер изменения зависимости $[\eta]$ от времени при температурах воздействия 180 и 200 °С свидетельствует о снижении скорости деструкции с увеличением продолжительности воздействия. Это может быть объяснено уменьшением молекулярной массы продуктов термодеструкции, поскольку скорость разрушения макромолекул уменьшается с понижением их молекулярной массы.

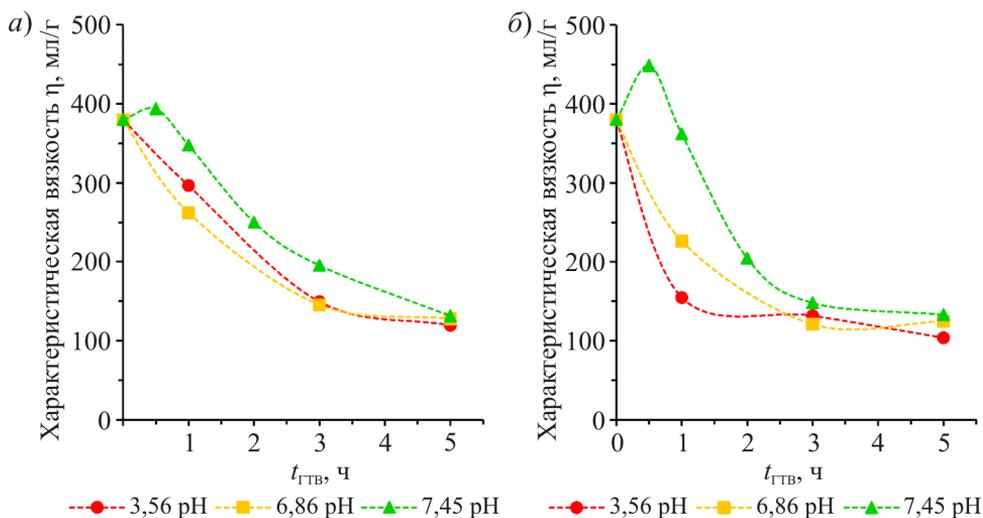


Рис. 7. Зависимости характеристической вязкости растворов акрилатного терполимера АА-АН-АМПСNa от времени гидротермального воздействия: а – при температуре 180 °С; б – при температуре 200 °С

Таким образом, термогидролизу в первую очередь подвергаются звенья АА и АН терполимера. При температуре воздействия 180 °С заметное изменение состава терполимера, обусловленное термогидролизом АА и АН звеньев, наблюдается после изотермической выдержки в течение 5 ч, при температуре 200 °С – 3 ч во всем диапазоне рН. Состав сополимеров приближается к АК-АМПСNa. В условиях длительного высокотемпературного гидротермального воздействия (5 ч при $T = 200$ °С) происходит частичный гидролиз звеньев АМПСNa. Оценка изменения характеристической вязкости продуктов деструкции терполимера АА-АН-АМПСNa позволяет предположить, что термическое воздействие на его растворы также приводит к частичной термодеструкции основной полимерной цепи, что усиливается с ростом температуры воздействия до 200 °С и продолжительности до 5 ч. Наибольшая устойчивость терполимера к термодеструкции наблюдается в нейтральной среде.

Список литературы

1. Иванов К.С. «Стратегия развития минерально-сырьевой базы Российской Федерации до 2035 года» и задачи уральской геологии // Уральский геологический журнал. – 2020. – № 4. – С. 3–18.
2. Егоров Н. Г. Бурение скважин в сложных геологических условиях. – Тула: Гриф и К, 2006. – 301 с.
3. Theoretical studies of hydrolysis and stability of polyacrylamide polymers / Q. Ma, P.J. Shuler, C.W. Aften, Y. Tang // Polymer Degradation Stability. – 2015. – Vol. 121. – P. 69–77.
4. Impact of acrylate and 2-acrylamido-tertiary-butyl sulfonic acid content on the enhanced oil recovery performance of synthetic polymers / A. Beteta, L. Nurmi, L. Rosati, S. Hanski, K. McIver, K. Sorbie, S. K. Toivonen // SPE Journal. – 2021. – Vol. 26, № 4. – P. 2092–2113.
5. Kelland M.A. Production chemicals for the oil and gas industry. – London; New York: CRC Press, 2014. – 454 p.
6. On the drag reduction effect and shear stability of improved acrylamide copolymers for enhanced hydraulic fracturing / N. Le Brun, I. Zadrazil, L. Norman, A. Bismarck, C. N. Markides // Chemical Engineering Science. – 2016. – Vol. 146. – P. 135–143.
7. Kamel A.N., Shah S.N. Effects of salinity and temperature on drag reduction characteristics of polymers in straight circular pipes // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2009. – Vol. 67, № 1–2. – P. 23–33.
8. Термические свойства сополимеров 2-акриламида-2-метилпропансульфоната натрия с акрилатом натрия / С.А. Швецова, Н.Н. Кухтинова, А.В. Куренков, В.Ф. Куренков // Вестник Казанского технологического университета. – 2010. – № 8. – С. 76–81.
9. Limparyoon N., Seetapan N., Kiatkamjornwong S. Acrylamide/2-acrylamido-2-methylpropane sulfonic acid and associated sodium salt superabsorbent copolymer nanocomposites with mica as fire retardants // Polymer Degradation and Stability. – 2011. – Vol. 96, № 6. – P. 1054–1063.
10. Исследование влияния состава тройного сополимера акриламида, нитрила акриловой кислоты и 2-акриламида-2-метилпропансульфоновой кислоты на его устойчивость к термосолевым агрессиям / А.И. Нечаев, И.И. Лебедева, В.А. Вальцифер, В.Н. Стрельников // Журнал прикладной химии. – 2016. – Т. 89, № 8. – С. 1047–1053.
11. Drag reduction by acrylate copolymers under thermohydrolysis / A.I. Nechaev, N.S. Voronina, V.N. Strelnikov, V.A. Valtsifer // Polymer Journal. – 2022. – Vol. 54. – P. 1029–1038.
12. Confirmation of polymerisation effects of sodium chloride and its additives on acrylamide by infrared spectrometry / E. Kolek, P. Simko, P. Simon, A. Gatial // Journal of Food and Nutrition Research. – 2007. – Vol. 46, № 1. – P. 39–44.

13. Rosa F., Bordado J., Casquilho M. Hydrosoluble copolymers of acrylamide-(2-acrylamido-2-methylpropanesulfonic acid). Synthesis and characterization by spectroscopy and viscometry // *Journal of Applied Polymer Science*. – 2003. – Vol. 87, № 2. – P. 192–198.

14. Synthesis, characterization, and solution behavior of a long-chain hydrophobic association anionic acrylamide/2-acrylamido-2-methylpropanesulfonic acid/n-octyl acrylate terpolymers / G. Qi, H. Li, R. Zhu, Z. Zhang, L. Zhou, J. Kuang // *Arabian Journal for Science and Engineering*. – 2017. – Vol. 42, № 6. – C. 2425–2432.

15. Thermal stability of polymers based on acrylamide and 2-acrylamido-2-methylpropane sulfonic acid in different temperature and salinity conditions / H.V.P. Vieira, P.F. Oliveira, J.A. Costa, L.A. de Oliveira, L.S. Mota, C.R.E. Mansur // *Journal of Applied Polymer Science*. – 2021. – Vol. 138, № 44. – P. 51301.

References

1. Ivanov K. S. Strategija razvitija mineral'no-syr'evoj bazy Rossijskoj Federacii do 2035 goda» i zadachi ural'skoj geologii [Strategy for the development of the mineral resource base of the Russian Federation until 2035" and the tasks of the Ural geology]. *Ural'skij geologičeskij zhurnal*, 2020. no. 4, pp.3-18.

2. Egorov N. G. Burenie skvazhin v slozhnyh geologičeskikh uslovijah [Drilling wells in difficult geological conditions]. Tula, Grif i K. 2006. 301 p.

3. Ma Q. Theoretical studies of hydrolysis and stability of polyacrylamide polymers *Polymer Degradation Stability*, 2015. Vol. 121. pp. 69-77.

4. Beteta A. Impact of acrylate and 2-acrylamido-tertiary-butyl sulfonic acid content on the enhanced oil recovery performance of synthetic polymers. *SPE Journal*, 2021. Vol. 26. no. 4. Pp. 2092-2113.

5. Kelland M. A. Production chemicals for the oil and gas industry. London, New York: CRC Press. 2014. 454 p.

6. Le Brun N. On the drag reduction effect and shear stability of improved acrylamide copolymers for enhanced hydraulic fracturing. *Chemical Engineering Science*, 2016. Vol. 146. pp. 135-143.

7. Kamel A. N. Effects of salinity and temperature on drag reduction characteristics of polymers in straight circular pipes. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2009. Vol. 67. no. 1–2. pp. 23-33.

8. Shevcova S. A. Termičeskie svojstva sopolimerov 2-akrilamido-2-metilpropan sulfonata natrija s akrilatom natrija [Thermal properties of copolymers of sodium 2-acrylamido-2-methylpropanesulfonate with sodium acrylate]. *Vestnik Kazanskogo tehnologičeskogo universiteta*, 2010. no. 8. pp. 76-81.

9. Limpariyoon N. Acrylamide/2-acrylamido-2-methylpropane sulfonic acid and associated sodium salt superabsorbent copolymer nanocomposites with

mica as fire retardants. *Polymer Degradation and Stability*. 2011. Vol. 96. no. 6. pp. 1054-1063.

10. Nechaev A. I. Issledovanie vlijanija sostava trojnogo sopolimera akrilamida, nitrila akrilovoj kisloty i 2-akrilamido-2-metilpropansul'fonovoj kisloty na ego ustojchivost' k termosolevoj agressii [Investigation of the influence of the composition of the ternary copolymer of acrylamide, acrylic acid nitrile and 2-acrylamido-2-methylpropanesulfonic acid on its resistance to thermal salt aggression]. *Zhurnal prikladnoj himii*, 2016. Vol. 89. no. 8. pp. 1047-1053.

11. Nechaev A. I. Drag reduction by acrylate copolymers under thermohydrolysis. *Polymer Journal*, 2022. Vol. 54. pp. 1029-1038.

12. Kolek E. Confirmation of polymerisation effects of sodium chloride and its additives on acrylamide by infrared spectrometry. *Journal of Food and Nutrition Research*, 2007. Vol. 46. no. 1. pp. 39-44.

13. Rosa F. Hydrosoluble copolymers of acrylamide-(2-acrylamido-2-methylpropanesulfonic acid). Synthesis and characterization by spectroscopy and viscometry. *Journal of Applied Polymer Science*, 2003. Vol. 87. no. 2. pp. 192-198.

14. Qi G. Synthesis, characterization, and solution behavior of a long-chain hydrophobic association anionic acrylamide/2-acrylamido-2-methylpropane-sulfonic acid/n-octyl acrylate terpolymers. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2017. Vol. 42. no. 6. – pp. 2425-2432.

15. Vieira H. V. P. Thermal stability of polymers based on acrylamide and 2-acrylamido-2-methylpropane sulfonic acid in different temperature and salinity conditions. *Journal of Applied Polymer Science*, 2021. Vol. 138. no. 44. pp. 51301.

Об авторах

Воронина Наталья Сергеевна (Пермь, Россия) – младший научный сотрудник, Институт технической химии Уральского отделения Российской академии наук – филиал Пермского федерального исследовательского центра УрО РАН (614013, г. Пермь, ул. Ак. Королева, 3; e-mail: voronina.n@itcras.ru).

Лебедева Ирина Игоревна (Пермь, Россия) – кандидат химических наук, научный сотрудник, Институт технической химии Уральского отделения Российской академии наук – филиал Пермского федерального исследовательского центра УрО РАН (614013, г. Пермь, ул. Ак. Королева, 3; e-mail: lebedeva.i@itcras.ru).

Нечаев Антон Игоревич (Пермь, Россия) – кандидат химических наук, научный сотрудник, Институт технической химии Уральского отделения Российской академии наук – филиал Пермского федерального исследовательского центра УрО РАН (614013, г. Пермь, ул. Ак. Королева, 3; e-mail: nechaev.a@itcras.ru).

Вальцифер Виктор Александрович (Пермь, Россия) – доктор технических наук, профессор, заместитель директора по научной работе, Институт технической химии Уральского отделения Российской академии наук – филиал Пермского федерального исследовательского центра УрО РАН (614013, г. Пермь, ул. Ак. Королева, 3; e-mail: valtsiferv@mail.ru).

Стрельников Владимир Николаевич (Пермь, Россия) – член-корреспондент РАН, доктор технических наук, профессор, директор, Институт технической химии Уральского отделения Российской академии наук – филиал Пермского федерального исследовательского центра УрО РАН (614013, г. Пермь, ул. Ак. Королева, 3; e-mail: svn@itcras.ru).

About the authors

Natalia S. Voronina (Perm, Russian Federation) – Junior Researcher, Institute of Technical Chemistry Ural Branch of the Russian Academy of Sciences – Branch of Perm Federal Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (3, str. Ak. Korolev, Perm, 614013, e-mail: voronina.n@itcras.ru).

Irina I. Lebedeva (Perm, Russian Federation) – Ph.D. in Chemical Sciences, Researcher, Institute of Technical Chemistry Ural Branch of the Russian Academy of Sciences – Branch of Perm Federal Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (3, str. Ak. Korolev, Perm, 614013, e-mail: lebedeva.i@itcras.ru).

Anton I. Nechaev (Perm, Russian Federation) – Ph.D. in Chemical Sciences, Researcher, Institute of Technical Chemistry Ural Branch of the Russian Academy of Sciences – Branch of Perm Federal Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (3, str. Ak. Korolev, Perm, 614013, e-mail: nechaev.a@itcras.ru).

Victor A. Valtsifer (Perm, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Deputy Director for Science, Institute of Technical Chemistry Ural Branch of the Russian Academy of Sciences – Branch of Perm Federal Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (3, str. Ak. Korolev, Perm, 614013, e-mail: valtsiferv@mail.ru).

Vladimir N. Strelnikov (Perm, Russian Federation) – Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Technical Sciences, Professor, Director, Institute of Technical Chemistry Ural Branch of the Russian Academy of Sciences – Branch of Perm Federal Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (3, str. Ak. Korolev, Perm, 614013, e-mail: svn@itcras.ru).

Поступила: 02.11.2022

Одобрена: 16.11.2022

Принята к публикации: 15.12.2022

Финансирование. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Пермского края в рамках научного проекта № 20-43-596014-р_НОЦ_Пермский край. Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Исследования материалов и вещества» ПФИЦ УрО РАН.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов равноценен.

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Термостабильность тройных сополимеров акриламида, акрилонитрила и 2-акриламидо-2-метилпропансульфоновой кислоты в разбавленных растворах при различных рН среды / Н.С. Воронина, И.И. Лебедева, А.И. Нечаев, В.А. Вальцифер, В.Н. Стрельников// Вестник ПНИПУ. Химическая технология и биотехнология. – 2022. – № 4. – С. 93–109.

Please cite this article in English as:

Voronina N.S., Lebedeva I.I., Nechaev A.I., Valtsifer V.A., Strelnikov V.N. Thermostability of triple copolymers of acrylamide, acrylonitrile, and 2-acrylamido-2-methylpropanesulfonic acid in dilute solutions at different pH medium. *Bulletin of PNRPU. Chemical Technology and Biotechnology*, 2022, no. 4, pp. 93-109 (*In Russ*).