

Научная статья

УДК 544.777: 678.744.329

<http://doi.org/10.17072/2223-1838-2023-3-160-171>

## Изучение влияния температуры и продолжительности гидротермального воздействия на устойчивость акрилатных терполимеров

Наталья Сергеевна Воронина, Ирина Игоревна Лебедева, Антон Игоревич Нечаев, Виктор Александрович Вальцифер, Владимир Николаевич Стрельников

«Институт технической химии Уральского отделения Российской академии наук» – филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Пермского федерального исследовательского центра Уральского отделения Российской академии наук, Пермь, Россия

**Аннотация.** Методами динамического светорассеяния, капиллярной вискозиметрии, а также методом ИК-Фурье спектроскопии изучено влияние температуры и длительности гидротермального воздействия на химический состав и структуру акрилатных ионогенных терполимеров акриламида (АА), акрилонитрила (АН) и натриевой соли 2-акриламидо-2-метилпропансульфокислоты (АМПСNa) АА–АН–АМПСNa. Установлено, что увеличение продолжительности и температуры воздействия повышает влияние термогидролиза на коллоидные характеристики терполимера, а именно: происходит снижение среднего гидродинамического размера сольватированных макромолекулярных полимерных клубков. Изучена взаимосвязь между химическим составом и структурой исходного терполимера и химическим составом и структурой фрагментов полимеров, образующихся после гидротермального воздействия. Определено, что повышение устойчивости при термогидролизе связано с присутствием в составе боковых групп полимерной цепи нитрильных и сульфонатных заместителей. Показано, что термическому воздействию в первую очередь подвергаются звенья АА и АН акрилатного терполимера. Заметное изменение состава терполимера после термогидролиза наблюдается в течение 5 ч при температуре воздействия 180 °С, и в течение 3 ч при 200 °С.

**Ключевые слова:** сополимеры акриламида; АМПСNa; термическое воздействие; гидролиз растворов полимеров; деструкция растворов полимеров; снижение гидродинамического сопротивления.

**Для цитирования:** Воронина Н.С., Лебедева И.И., Нечаев А.И., Вальцифер В.А., Стрельников В.Н. Изучение влияния температуры и продолжительности гидротермального воздействия на устойчивость акрилатных терполимеров // Вестник Пермского университета. Серия «Химия». 2023. Т. 13, № 3. С. 160–171. <http://doi.org/10.17072/2223-1838-2023-3-160-171>.

Original Article

<http://doi.org/10.17072/2223-1838-2023-3-160-171>

## Study of the effect of temperature and duration of hydrothermal exposure on the stability of acrylate terpolymers

Natalia S. Voronina, Irina I. Lebedeva, Anton I. Nechaev, Victor A. Valtsifer, Vladimir 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

**Abstract.** Dynamic light scattering, capillary viscometry, and IR-Fourier spectroscopy have been used to study the effect of temperature and duration of hydrothermal exposure on the chemical composition and structure of acrylate ionic terpolymers of acrylamide (AA), acrylonitrile (AN), and sodium salt 2-acrylamide-2-methylpropanesulfonic acid (AMPSNa) AA-AN-AMPSNa. It has been established that an increase in the duration and temperature of exposure increases the effect of thermohydrolysis on the colloidal characteristics of the terpolymer, namely, the average hydrodynamic size of the solvated macromolecular polymer coils decreases. A relationship has been established between the chemical composition and structure of the initial terpolymer and the chemical composition and structure of polymer fragments formed after hydrothermal exposure. It has been determined that the increase in stability during thermohydrolysis is associated with the presence of nitrile and sulfonate substituents in the side groups of the polymer chain. It has been shown that the AA and AN units of the acrylate terpolymer are primarily subjected to thermal treatment. A noticeable change in the composition of the terpolymer after thermohydrolysis is observed for 5 hours at an exposure temperature of 180 °C, and for 3 hours at 200 °C.

**Key words:** acrylamide copolymers; AMPSNa; thermal impact; hydrolysis of polymer solutions; destruction of polymer solutions; reduction of hydrodynamic resistance.

**For citation:** Voronina, N.A., Lebedeva, I.I., Nechaev, A.I., Valtsifer, V.A. and Strelnikov, V.N. (2023) “Study of the effect of temperature and duration of hydrothermal exposure on the stability of acrylate terpolymers”, *Bulletin of Perm University. Chemistry*, vol. 13, no. 3, pp. 160–171. (In Russ.). <http://doi.org/10.17072/2223-1838-2023-3-160-171>.



Эффект Томса, связанный со снижением гидродинамических потерь при течении турбулентных водных потоков при введении добавок линейных высокомолекулярных полимеров, нашел широкое применение на практике для интенсификации процессов бурения скважин, а также при применении технологии гидроразрыва пласта. 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 90–160°C, что сказывается на рабочих характеристиках всех компонентов буровых растворов.

Как показали исследования, применение полиакриламида при повышенных температурах в качестве добавки, снижающей гидродинамическое сопротивление турбулентных потоков, невозможно вследствие его гидролиза и деструкции [3, 4].

Термостойкость и устойчивость термогидролизу водорастворимых сополимеров определяется химической природой основной цепи полимера, а также боковых заместителей [5, 6]. Более стойкими к условиям температурного воздействия являются сополимеры акриламида с объемными сульфонатными заместителями в боковой цепи [7, 8]. В работе [9] показано, что присутствие 2-акриламидо-2-метилпропансульфоновой кислоты (АМПСК) в основной цепи полимера повышает эффективность полиакриламида в качестве агента снижения гидродинамического сопротивления турбулентного потока в капилляре. Исследование термических

превращений в окислительной воздушной среде сополимеров акрилата натрия с 2-акриламидо-2-метилпропансульфонатом натрия (АМПСNa) в диапазоне от 20 до 500°C установили, что все сополимеры характеризуются устойчивостью к термическому воздействию до 56°C, при этом, в области 225–250°C термическая стабильность возрастает с увеличением содержания звеньев АМПСNa в сополимере [10]. Аналогичные данные получены для сополимеров акриламида и АМПСК [5]. 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°C в течение 5 ч [11, 12]. Однако отсутствуют данные о влиянии гидротермального воздействия на химический состав и коллоидные характеристики макромолекул, что является определяющим для снижения гидродинамического сопротивления турбулентных водных потоков полимерами.

Таким образом, целью данной работы являлось установление закономерностей деструкции тройного сополимера акриламида, акрилонитрила и 2-акриламидо-2-метилпропансульфоновой кислоты в разбавленных растворах различных рН при повышенных температурах 180–200°C.

#### **Объекты и методы исследования**

Объектом исследования является акрилатный терполимер акриламида (АА), акрилонитрила (АН) и натриевой соли 2-акриламидо-2-метилпропансульфонокислоты (АМПСNa) АА–АН–АМПСNa с соотношением звеньев

[72]:[10]:[18] мол.%, полученный методом радикальной сополимеризации в водном растворе по методике, описанной авторами ранее в исследовании [11]. Полученные сополимеры очищали от остаточных мономеров осаждением из водных растворов в десятикратном избытке ацетона, промывали ацетоном и далее выдерживали в вакуум-сушильном шкафу при 60°C до постоянной массы.

Термическую стабильность акрилатного терполимера исследовали следующим образом: 1) Готовили разбавленные 1 % растворы терполимера АА–АН–АМПСNa в дистиллированной воде; 2) Полученный раствор терполимера термостатировали в автоклавах в изохорно-изотермических условиях при температурах от 80 до 200°C в течение 0,5-5 ч; 3) После термогидролиза, продукты деструкции терполимера высаждали десятикратным избытком ацетона, трижды промывали ацетоном и этанолом, затем сушили под вакуумом при 60°C до постоянной массы.

Дисперсные характеристики полимерных клубков до и после гидротермального воздействия определяли методом динамического светорассеяния на приборе ZetaPALS (Brookhaven Inst. Co, США). Обработку результатов проводили с помощью программного обеспечения Particle Solutions ver. 3.0 (Brookhaven Inst. Co, США). Измерения среднего диаметра макромолекулярных клубков и их распределение по размерам (индекс полидисперсности PDI) проводили в сильноразбавленных водных растворах (концентрация полимера в растворе составляла менее 0,01 %).

Состав тройных сополимеров АА–АН–АМПСNa до и после гидротермального воздействия определяли по результатам ИК-Фурье

спектроскопии. ИК спектры были получены на спектрометре IFS 66/SBruker в диапазоне 400-4000 см<sup>-1</sup>, в том числе в режиме НПВО. Образцы для анализа готовили прессованием таблеток с KBr (1 мг образца к 299 мг KBr).

Характеристическую вязкость  $[\eta]$  исходного сополимера и продуктов его деструкции после термогидролиза определяли методом капиллярной вискозиметрии в 0,5 М растворе хлорида натрия при 30°C, используя стеклянный вискозиметр ВПЖ-1 с диаметром капилляра  $d_k = 0.54$  мм. На основании измерений строили линейные концентрационные зависимости

$$\frac{\eta_{уд.}}{C_n} = f(C_n)$$

где  $C_n$  – концентрация полимера. При экстраполяции полученных прямых к нулевой концентрации находили характеристическую вязкость полимера:

$$[\eta] = \lim \left( \frac{\eta_{уд.}}{C_n} \right), \text{ при } C_n \rightarrow 0.$$

### Результаты и их обсуждение

Все исследования проводили с термостойким [13] водорастворимым терполимером, содержащим 72 мол.% АА, 10 мол.% АН и 18 мол.% АМПСNa, с исходной характеристической вязкостью 380 мл/г, и средним размером макромолекулярных клубков 4170±54 нм.

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

Методом динамического светорассеяния в сильноразбавленных растворах были проведены исследования влияния температуры и дли-

тельности гидротермального воздействия на эффективный диаметр сольватированных макромолекулярных клубков акрилатных ионогенных терполимеров АА–АН–АМПСNa (рис. 1). Увеличение температуры термогидролиза приводит к снижению значений характеристической вязкости (табл. 1), что связано с деструкцией полимерных клубков вследствие их термогидролиза. Как видно из полученных данных до температуры порядка 120°C изменения среднего размера макромолекулярных клубков практически не происходит. При дальнейшем повышении температуры от 140 до 200°C существенно начинает снижаться средний размер полимерных клубков. Так при 140°C значение составляет 2747 нм, а при 200°C уже всего лишь 1082 нм, что в 3 раза меньше среднего размера клубков исходного терполимера.

Влияние увеличения длительности гидротермального воздействия на коллоидные характеристики макромолекулярных клубков также оценивали по скорости изменения характеристической вязкости в процессе гидротермального воздействия при температурах 180 и

200°C, для которых наиболее полно протекает термогидролиз звеньев АА и АН терполимера (табл. 2, рис. 1). Из полученных данных можно сделать вывод, что скорость изменения характеристической вязкости увеличивается с повышением температуры гидротермального воздействия от 180 до 200°C, что в сумме с уменьшением значений характеристической вязкости при данных температурах можно рассматривать как усиление термодеструкции при повышении температуры гидротермального воздействия.

Таблица 1.

Влияние температуры термогидролиза на параметры терполимера

Температура гидротермального воздействия, °С	Характеристическая вязкость [η], мл г <sup>-1</sup>	Эффективный диаметр макромолекулярных клубков, нм
80	338	3103
100	316	3168
120	273	3489
140	251	2747
160	219	2536
180	186	2381
200	124	1082

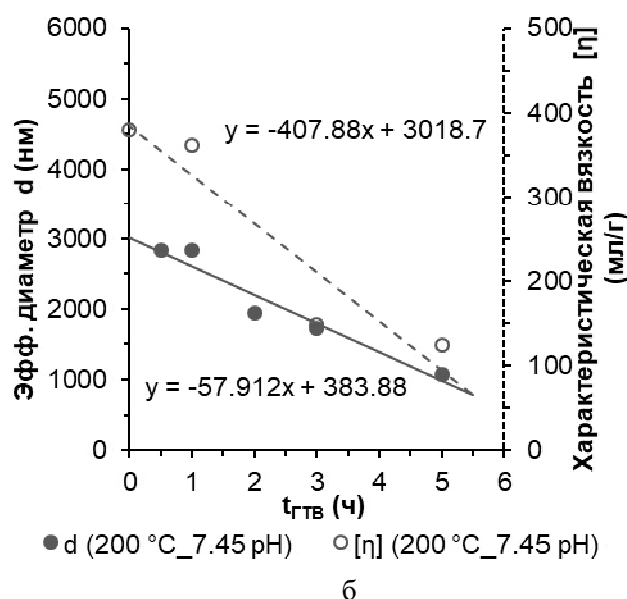
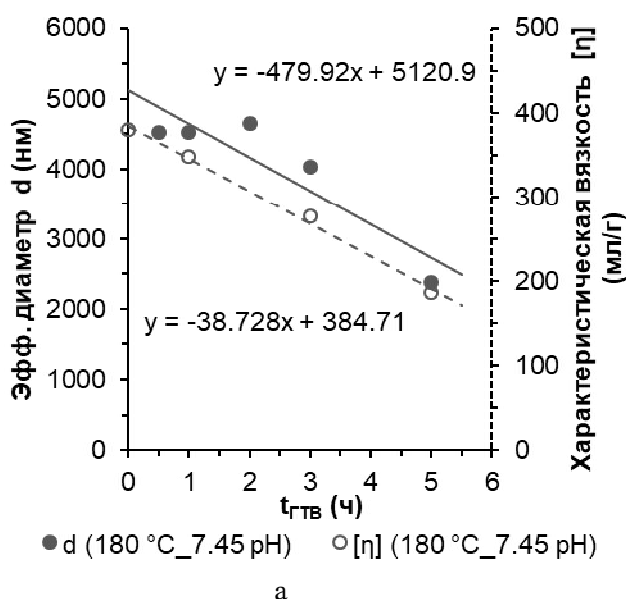


Рис. 1. Зависимости эффективного диаметра и характеристической вязкости растворов акрилатного терполимера АА–АН–АМПСNa от времени гидротермального воздействия при температурах 180 и 200°C

Таблица 2.

Скорость термодеструкции акрилатного терполимера АА–АН–АМПСNa при гидротермальном воздействии

Скорость термодеструкции			
по изменению характеристической вязкости (мл·г <sup>-1</sup> ·ч <sup>-1</sup> )		по изменению эффективного диаметра (нм·ч <sup>-1</sup> )	
180°С	200°С	180°С	200°С
38,428	57,912	479,92	407,88

Из анализа зависимостей характеристической вязкости раствора  $[\eta]$  от времени следует, что уменьшение вязкости разбавленных растворов терполимера при 180 и 200°С является необратимым процессом. Экспериментальные 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, по-

скольку скорость разрушения макромолекул уменьшается с понижением их молекулярной массы.

Полученные зависимости изменения среднего размера сольватированных макромолекулярных клубков от температуры и времени термогидролиза достаточно хорошо коррелируют с изменением средневязкостной молекулярной массы от температуры.

Изменение химического состава акрилатного терполимера в условиях термического воздействия на его растворы происходит вследствие протекания гидролиза функциональных групп звеньев АА, АН, АМПСNa.

Исследование влияния температуры и продолжительности термогидролиза на химический состав акрилатного терполимера были проведены методом ИК спектроскопии.

На рис. 2 представлены ИК-спектры исходного акрилатного терполимера, а также гидротермально обработанных образцов терполимера при температурах от 100 до 200°С.

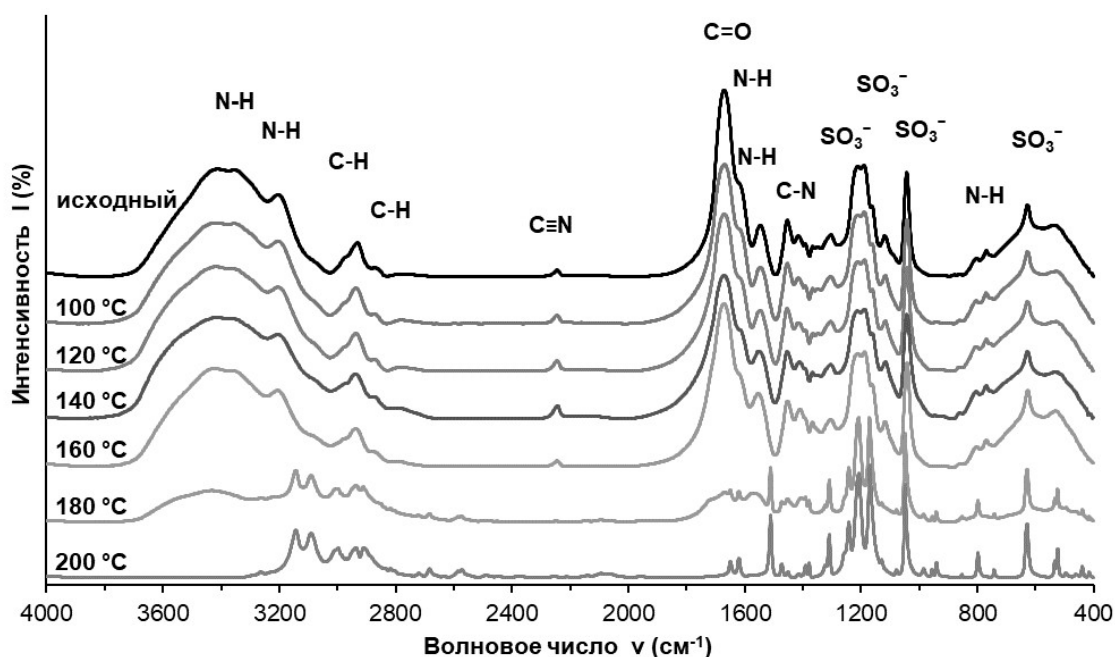


Рис. 2. ИК спектры акрилатного терполимера АА–АН–АМПСNa, до и после гидротермального воздействия при различных температурах среды

В ИК спектре исходного терполимера наблюдаются характерные полосы поглощения звеньев АА, АН и АМПСНа: п.п. при  $1672\text{ см}^{-1}$  – валентные колебания карбонильной группы  $\text{C}=\text{O}$  (амидная полоса I); п.п. при  $3352\text{ см}^{-1}$  и  $3207\text{ см}^{-1}$  – валентные антисимметричные и симметричные колебания группы  $\text{N}-\text{H}$  первичного амида; п.п. при  $1617\text{ см}^{-1}$  – деформационные колебания  $\text{N}-\text{H}$  первичного амида (амидная полоса II); п.п. при  $1547\text{ см}^{-1}$  – деформационные колебания  $\text{N}-\text{H}$  вторичного амида (амидная полоса II); п.п. при  $1416\text{ см}^{-1}$  – колебания группы  $\text{C}-\text{N}$ ; п.п. при  $771\text{ см}^{-1}$  – деформационные внеплоскостные колебания  $\text{N}-\text{H}$  (амид V);  $\text{C}\equiv\text{N}$  колебания в акрилонитриле при  $2245\text{ см}^{-1}$ ; п.п. при  $1188\text{ см}^{-1}$  и  $1043\text{ см}^{-1}$  – валентные симметричные и асимметричные колебания  $\text{S}=\text{O}$ ; п.п. при  $625\text{ см}^{-1}$  – валентные колебания  $\text{S}-\text{O}$ ; п.п. при  $1217\text{ см}^{-1}$  валентные колебания  $\text{SO}_2$ ; п.п. при  $\sim 3500\text{ см}^{-1}$  – валентные колебания  $\text{OH}$  групп; п.п. при  $2933\text{ см}^{-1}$  – валентные колебания  $-\text{CH}_3$  [14] [15].

Из рис. 2 видно, что при проведении процесса гидротермальной обработки акрилатного терполимера до температур порядка  $120^\circ\text{C}$  никаких изменений в химическом составе не наблюдается. Из представленных данных видно, что при повышении температуры термогидролиза вплоть до  $160^\circ\text{C}$  не происходит образования новых химических соединений, меняются только интенсивности и соотношения существующих п.п. Необходимо отметить, что снижается интенсивность п.п. при  $1619$  и  $3208\text{ см}^{-1}$  ( $\text{N}-\text{H}$ , амид II) по отношению к п.п.  $1670\text{ см}^{-1}$  ( $\text{C}=\text{O}$ ) и п.п.  $2938\text{ см}^{-1}$  ( $\text{C}-\text{H}$ ), что обусловлено превращением амидной группы в карбоксильную под действием термогидролиза. После гидротермальной обработки терполимеров, п.п. при

$2240\text{ см}^{-1}$ , характеризующая присутствие в составе полимера нитрильных групп, остается вплоть до  $160^\circ\text{C}$ . При достижении  $180^\circ\text{C}$  наблюдается резкое изменение химического состава, полностью пропадают амидные группы, а также практически пропадают карбоксильные и гидроксильные. В составе сополимеров остаются только сульфогруппы, углеродная основная цепь и метильные заместители. При  $200^\circ\text{C}$  в ИК спектре сополимера карбоксильные и гидроксильные группы отсутствуют полностью. Без изменений в интенсивности вне зависимости от температуры остаются также п.п.  $627$ ,  $1042$ ,  $1187$  и  $1212\text{ см}^{-1}$  характеризующие сульфогруппу.

Из ИК спектров продуктов деструкции исходного акрилатного терполимера при различной продолжительности воздействия, полученных методом НПВО (рис. 3), видно, что при температуре  $180^\circ\text{C}$  в течение  $0,5-3$  ч во всем диапазоне рН наблюдается только изменение интенсивности п.п. и их соотношения. Так, у п.п. при  $1670\text{ см}^{-1}$  появляется плечо при п.п.  $1720\text{ см}^{-1}$ , отвечающее связи  $\text{C}=\text{O}$  карбоксильной группы. Наблюдается рост интенсивности п.п. при  $1552\text{ см}^{-1}$ , относящейся к деформационным колебаниям связи  $\text{C}=\text{O}$  карбоксилат аниона, относительно п.п.  $1667\text{ см}^{-1}$  ( $\text{C}=\text{O}$ , амид I), снижается интенсивность п.п. при  $1617$  и  $3207\text{ см}^{-1}$  ( $\text{N}-\text{H}$ , амид II) по отношению к п.п.  $1670\text{ см}^{-1}$  ( $\text{C}=\text{O}$ ) и п.п.  $2938\text{ см}^{-1}$  ( $\text{C}-\text{H}$ ), что обусловлено превращением амидной группы в карбоксильную в процессе термогидролиза. В ИК спектрах, полученных методом НПВО, слабо разрешены п.п. в диапазоне  $2200-2300\text{ см}^{-1}$ , характерные для нитрильных групп, что обусловлено ограничениями методики эксперимента (ИК спектры сняты для свежесозданных терполимеров в режиме НПВО). При уве-

личении продолжительности воздействия до 5 ч наблюдается существенное изменение ИК-спектра терполимера. Пропадает п.п., характерная для амидной связи в звеньях АА при  $1617\text{ см}^{-1}$  (N–H, амид II). Также происходит смещение п.п. C=O при  $1672\text{ см}^{-1}$  в область более высоких волновых чисел, что говорит о

полном превращении амидной группы в карбоксильную. При температуре воздействия  $200^\circ\text{C}$  заметные изменения в ИК-спектрах, обусловленные термогидролизом АА звеньев терполимера, наблюдаются уже после изотермической выдержки в течение 3 ч во всем диапазоне pH.

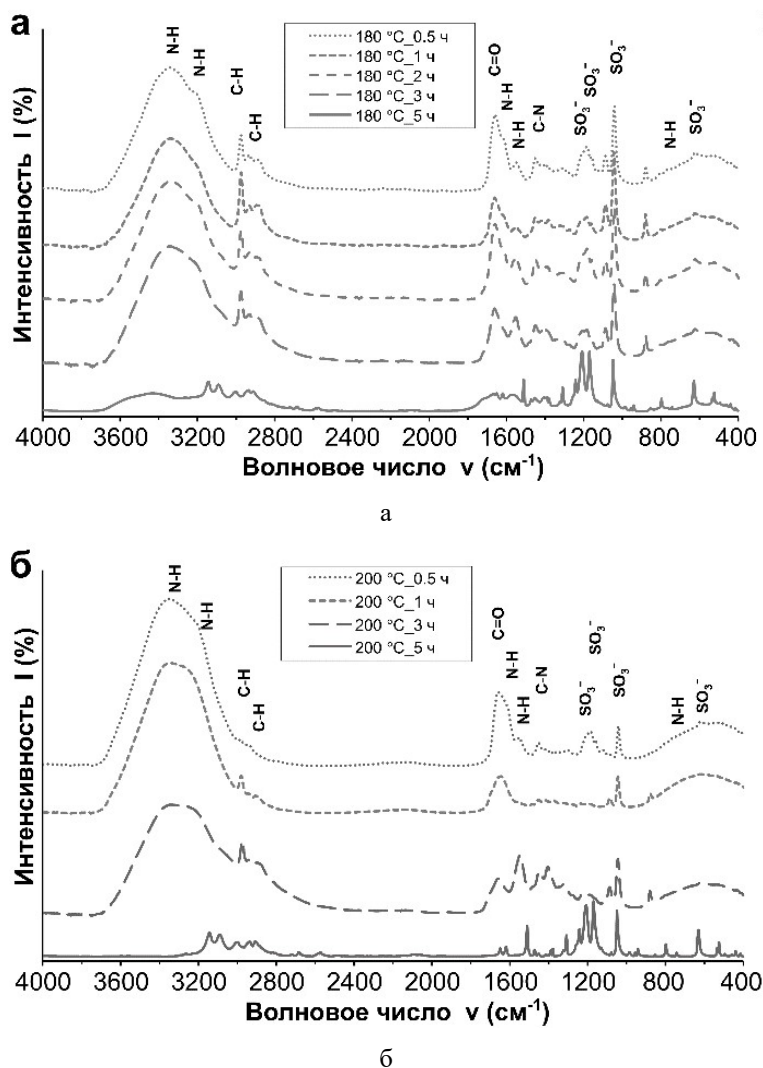


Рис. 3. ИК-спектры НПВО акрилатного терполимера АА–АН–АМПСNa после гидротермального воздействия при  $180^\circ\text{C}$  (а) и  $200^\circ\text{C}$  (б)

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  $1212\text{ см}^{-1}$ ). Удаление объем-

ного бокового сульфонатного заместителя может приводить к изменению пространственной структуры макромолекул терполимера.

### Заключение

Общая степень гидролиза терполимера АА–АН–АМПСNa, за счет гидролиза звеньев АА, уменьшается с ростом содержания исходных

кислотных АМПСNa и нитрильных АН звеньев в терполимере, что, по всей видимости, связано как с высокой энергией нитрильной связи –  $C\equiv N$ , так и с электростатическим фактором сильной кислотной  $-SO_3^-$  группы в составе мономера АМПСNa. АМПСNa обладает геминальной диметильной группой, которая более прочно связывается с основной цепью полимера. Такая конфигурация может размещать отрицательно заряженную сульфонатную группу в непосредственной близости от соседней амидной группы, что приводит к усиленному отталкиванию атакующего при гидролизе гидроксид-аниона от амидной группы.

Термогидролизу в первую очередь подвергаются звенья АА и АН терполимера. Показано, что при повышении температуры термогидролиза вплоть до  $160^\circ C$  не происходит образования новых химических соединений из синтезированного терполимера. При температуре воздействия  $180^\circ C$  заметное изменение состава терполимера, обусловленное термогидролизом

АА и АН звеньев, наблюдается после изотермической выдержки в течение 5 ч, при температуре  $200^\circ C$  – 3 ч. Состав сополимеров приближается к АК-АМПСNa.

Установлено, что под влиянием термогидролиза происходит не только изменение химического состава сополимера, но и его частичная деструкция. Определено, что увеличение продолжительности и температуры воздействия повышает влияние термогидролиза на коллоидные характеристики терполимера, а именно: происходит снижение среднего гидродинамического размера сольватированных макромолекулярных полимерных клубков.

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  $200^\circ C$  и продолжительности до 5 ч.

#### Список источников

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. Kamel A., 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.
4. Zhang K., Lim G. H., Choi H. J. Mechanical degradation of water-soluble acrylamide copolymer under a turbulent flow: Effect of molecular weight and temperature // Journal of Industrial and Engineering Chemistry. 2016. Vol. 33. P. 156–161. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2015.09.031>.
5. Limpariyoon 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.
6. Jouenne S. Polymer flooding in high temperature, high salinity conditions: Selection of polymer type and polymer chemistry, thermal stability // Journal of Petroleum Science and Engineering. 2020. Vol. 195. P. 107545. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2020.107545>.



7. *Beteta A., Nurmi L., Rosati L. et al.* 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, № 4. P. 2092–2113. <https://doi.org/10.2118/200441-PA>.
8. *Kelland M. A.* Production chemicals for the oil and gas industry. London, New York: CRC Press. 2014.
9. *Le Brun N., Zadrazil, I., Norman, L., et al.* On the drag reduction effect and shear stability of improved acrylamide copolymers for enhanced hydraulic fracturing // *Chemical Engineering Science*. 2016. Vol. 146. P. 135–143. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2016.02.009>.
10. *Шевцова С. А., Шевцова, С. А., Кухтинова, Н. Н., Куренков, А. В. и др.* Термические свойства сополимеров 2-акриламида-2-метилпропансульфоната натрия с акрилатом натрия // *Вестник Казанского технологического университета*. 2010. № 8. С. 76–81.
11. *Нечаев А. И., Лебедева И.И., Вальцифер В.А., и др.* Исследование влияния состава тройного сополимера акриламида, нитрила акриловой кислоты и 2-акриламида-2-метилпропансульфоновой кислоты на его устойчивость к термосолевым агрессиям // *Журнал прикладной химии*. 2016. Т. 89, № 8. С. 1047–1053.
12. *Nechaev A.I., Voronina N.S., Strelnikov V.N., et al.* Drag reduction by acrylate copolymers under thermohydrolysis // *Polymer Journal*. 2022. Vol. 54. P. 1029–1038. <https://doi.org/10.1038/s41428-022-00649-5>.
13. *Нечаев А. И., Горбунова М.Н., Лебедева И.И. и др.* Исследование радикальной полимеризации и структуры противотурбулентных терполимеров на основе акриламида, акрилонитрила и 2-акриламида-2-метилпропансульфоновой кислоты // *Журнал прикладной химии*. 2017. Т. 90, № 9. С. 1234–1242.
14. *Kolek E., Šimko P., Šimon P. et al.* Confirmation of polymerisation effects of sodium chloride and its additives on acrylamide by infrared spectrometry // *Journal of Food and Nutrition Research*. 2007. V. 46, № 1. P. 39–44.
15. *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. V. 87, № 2. P. 192–198.

#### Информация об авторах

**Наталья Сергеевна Воронина**, кандидат химических наук, научный сотрудник, «Институт технической химии Уральского отделения Российской академии наук» – филиал Пермского федерального исследовательского центра Уральского отделения Российской академии наук (614013, Россия, Пермь, Ак. Королева, 3), e-mail: voronina.n@itcras.ru

**Ирина Игоревна Лебедева**, кандидат химических наук, научный сотрудник, «Институт технической химии Уральского отделения Российской академии наук» – филиал Пермского федерального исследовательского центра Уральского отделения Российской академии наук (614013, Россия, Пермь, Ак. Королева, 3), lebedeva.i@itcras.ru

**Нечаев Антон Игоревич**, кандидат химических наук, научный сотрудник, «Институт технической химии Уральского отделения Российской академии наук» – филиал Пермского федерального

исследовательского центра Уральского отделения Российской академии наук (614013, Россия, Пермь, Ак. Королева, 3), nechaev.a@itcras.ru

**Вальцифер Виктор Александрович**, доктор технических наук, профессор, заместитель директора по научной работе, «Институт технической химии Уральского отделения Российской академии наук» – филиал Пермского федерального исследовательского центра Уральского отделения Российской академии наук (614013, Россия, Пермь, Ак. Королева, 3), valtsiferv@mail.ru

**Стрельников Владимир Николаевич**, член-корреспондент РАН, доктор технических наук, профессор, директор, «Институт технической химии Уральского отделения Российской академии наук» – филиал Пермского федерального исследовательского центра Уральского отделения Российской академии наук (614013, Россия, Пермь, Ак. Королева, 3), svn@itcras.ru

#### Финансирование

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Пермского края в рамках научного проекта № 20-43-596014-р\_НОЦ\_Пермский край

#### Благодарности

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Исследования материалов и вещества» ПФИЦ УрО РАН.

#### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

*Поступила 8 сентября 2023 г.; принята к публикации 12 сентября 2023 г.*

#### References

1. Ivanov, K. S. (2020) «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 geologicheskij zhurnal*, no.4, pp. 3–18. (in Russ.)
2. Egorov, N. G. (2006) *Burenie skvazhin v slozhnyh geologicheskikh uslovijah* [Drilling wells in difficult geological conditions], Tula, Grif i K. (in Russ.)
3. Kamel, A. and Shah, S. N. (2009) “Effects of salinity and temperature on drag reduction characteristics of polymers in straight circular pipes”, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, vol. 67, pp. 23–33.
4. Zhang, K., Lim, G. H. and Choi, H. J. (2016) “Mechanical degradation of water-soluble acrylamide copolymer under a turbulent flow: Effect of molecular weight and temperature”, *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, vol. 33, pp. 156–161.
5. Limpanyoon, N., Seetapan, N. and Kiatkamjornwong, S. (2011) “Acrylamide/2-acrylamido-2-methylpropane sulfonic acid and associated sodium salt superabsorbent copolymer nanocomposites with mica as fire retardants”, *Polymer Degradation and Stability*, vol. 96, no. 6, pp. 1054–1063.
6. Jouenne, S. (2020) “Polymer flooding in high temperature, high salinity conditions: Selection of polymer type and polymer chemistry, thermal stability”, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, vol. 195, p. 107545.

7. Beteta, A., Nurmi, L., Rosati, L., Hanski, S., McIver, K., Sorbie, K. and Toivonen, S. K. (2021) “Impact of Acrylate and 2-Acrylamido-Tertiary-Butyl Sulfonic Acid Content on the Enhanced Oil Recovery Performance of Synthetic Polymers”, *SPE Journal*, vol. 26, no. 4, pp. 2092–2113.
8. Kelland, M. A. (2014) *Production Chemicals for the Oil and Gas Industry*. 2nd ed. BocaRaton, London, NewYork: CRC Press.
9. Le Brun, N., Zadrazil, I., Norman, L., Bismarck, A. and Markides, C.N. (2016) “On the drag reduction effect and shear stability of improved acrylamide copolymers for enhanced hydraulic fracturing”, *Chemical Engineering Science*, vol. 146, pp. 135–143.
10. Shevtsova, S. A., Kuhtinova, N.N., Kurenkov, A.V. and Kurenkov, V.F. (2010) “Termicheskie svoystva sopolimerov 2-akrilamido-2-metilpropansul'fonata natrija s akrilatom natrija [Thermal properties of copolymers of sodium 2-acrylamido-2-methylpropanesulfonate with sodium acrylate]”, *Vestnik Kazanskogo tehnologicheskogo universiteta*, no. 8, pp. 76–81. (in Russian)
11. Nechaev, A.I., Lebedeva, I.I., Val'tsifer, V.A. and Strel'nikov, V.N. (2016) “Influence of the composition of acrylamide–acrylonitrile–2-acrylamido-2-methylpropanesulfonic acid terpolymer on its resistance to high temperatures and salts”, *Russian Journal of Applied Chemistry*, vol. 89, no. 8, pp. 1296–1301.
12. Nechaev, A.I., Voronina, N.S., Strelnikov, V.N. and Valtsifer, V.A. (2022) “Drag reduction by acrylate copolymers under thermohydrolysis”, *Polymer Journal*, vol. 54, no. 8, pp. 1029–1038.
13. Nechaev, A. I., Gorbunova, M.N., Lebedeva, I.I., Val'tsifer, V.A. and Strel'nikov, V.N. (2017) “Synthesis by radical polymerization and structure of drag reducing terpolymers based on acrylamide, acrylonitrile, and 2-acrylamido-2-methylpropanesulfonic acid”, *Russian Journal of Applied Chemistry*, vol. 90, no. 9, pp. 1524–1531.
14. Kolek, E., Simko, P., Simon, P. and Gatial, A. (2007) “Confirmation of polymerisation effects of sodium chloride and its additives on acrylamide by infrared spectrometry”, *Journal of Food and Nutrition Research*, vol. 46, no. 1, pp. 39–44.
15. Rosa, F., Bordado, J. and Casquilho, M. (2003) “Hydrosoluble copolymers of acrylamide-(2-acrylamido-2-methylpropanesulfonic acid). Synthesis and characterization by spectroscopy and viscometry”, *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 87, no. 2, pp. 192–198.

#### Information about the authors

**Natalia S. Voronina**, Candidate of Chemistry Science, 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, Ak. Korolev str., Perm, 614013, Russia), voronina.n@itcras.ru

**Irina I. Lebedeva**, Candidate of Chemistry Science, 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, Ak. Korolev str., Perm, 614013, Russia), lebedeva.i@itcras.ru

**Anton I. Nechaev**, Candidate of Chemistry Science, 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, Ak. Korolev str., Perm, 614013, Russia), nechaev.a@itcras.ru

**Victor A. Valtsifer**, 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, Ak. Korolev str., Perm, 614013, Russia), valtsiferv@mail.ru

**Vladimir N. Strelnikov**, 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, Ak. Korolev str., Perm, 614013, Russia), svn@itcras.ru

#### **Conflicts of interests**

The authors declare no conflicts of interests.

*Submitted 8 September 2023; accepted 12 September 2023*