

## ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

УДК 66.0:771.516

DOI 10.55421/3034-4689\_2026\_29\_6\_43

М. А. Силин, Л. А. Магадова, Л. Р. Газалеева

ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ РАСТВОРИМОСТИ МАКРОМОЛЕКУЛЫ  
АНИОННЫХ СОПОЛИМЕРОВ АКРИЛАМИДА В МОДЕЛЬНЫХ ВОДАХ*Ключевые слова: полиакриламид, растворение, коэффициент Хаггинса, сегмент Куна, гидродинамический радиус, капиллярная вискозиметрия.*

Водорастворимые полимеры подразделяются на природные (ксантан, гуар, нативная целлюлоза), искусственные (модифицированная целлюлоза) и синтетические (полиакриламид). Благодаря способности повышать вязкость воды данные полимеры активно применяются при реализации химических методов увеличения нефтеотдачи (полимерное, ПАВ-полимерное и щелочь-ПАВ-полимерное заводнение). Несмотря на высокую стойкость биополимеров к деградации под воздействием высокоминерализованной пластовой воды и повышенных температур, наиболее распространенным представителем данного класса является полиакриламид (гидролизированный, сульфированный), однако существенным его ограничением является подверженность к деградации, образование нерастворимых глобул и, соответственно, снижение вязкости. Традиционно стойкость полиакриламида к химической, механической или термоокислительной деградации оценивали по снижению скрин-фактора или динамической вязкости. В данной работе растворимость и влияние повышения минерализации модельной воды оценивается вискозиметрическим методом (относительный метод) с определением значений характеристической вязкости и молекулярной массы анионных сополимеров акриламида. По значениям молекулярной массы и характеристической вязкости рассчитывались коэффициент Хаггинса, сегмент Куна, гидродинамический радиус и объем макромолекулы. Повышение минерализации затворяемой воды приводит к снижению характеристической вязкости, молекулярной массы, гидродинамического радиуса и объема клубка макромолекул. Для сульфированного образца, который синтезирован под условия высокой минерализации и пластовой температуры, происходит снижение константы Хаггинса при одновременном увеличении сегмента Куна (жесткости), что указывает на хорошее сродство полимера и растворителя и применимость ПАА под выбранные условия. Данная методика определения растворимости и стабильности в осложненных условиях пласта может быть рекомендована в дополнение к способу определения коэффициента стойкости с помощью измерения скрин-фактора или динамической вязкости.

M. A. Silin, L. A. Magadova, L. R. Gazaleeva

RESEARCH OF PHYSICAL PARAMETERS OF SOLUBILITY OF MACROMOLECULES  
OF ANIONIC COPOLYMERS OF ACRYLAMIDE IN MODEL WATERS*Keywords: polyacrylamide, dissolution, Huggins coefficient, Kuhn segment, hydrodynamic radius, capillary viscometry.*

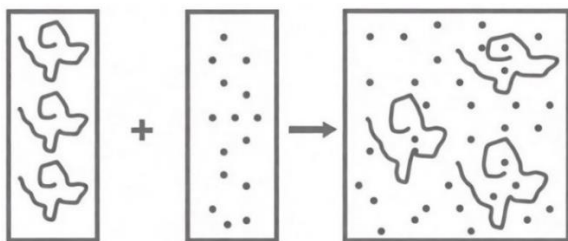
Water-soluble polymers are classified as natural (xanthan, guar, native cellulose), artificial (modified cellulose), and synthetic (polyacrylamide). Due to their ability to increase water viscosity, these polymers are widely used in chemical enhanced oil recovery methods (polymer, surfactant-polymer, and alkali-surfactant-polymer flooding). Despite the high resistance of biopolymers to degradation under the influence of highly mineralized formation water and elevated temperatures, the most common representative of this class is polyacrylamide (hydrolyzed, sulfonated). However, its significant limitation is its susceptibility to degradation, the formation of insoluble globules, and, consequently, a decrease in viscosity. Traditionally, the resistance of polyacrylamide to chemical, mechanical, or thermal-oxidative degradation has been assessed by a decrease in the screen factor or dynamic viscosity. In this study, the solubility and the effect of increasing the mineralization of model water are assessed using a viscometric method (relative method) to determine the intrinsic viscosity and molecular weight of anionic acrylamide copolymers. The Huggins coefficient, Kuhn segment, hydrodynamic radius, and macromolecular coil volume were calculated using the molecular weight and intrinsic viscosity values. Increasing the mineralization of the sample water leads to a decrease in the intrinsic viscosity, molecular weight, hydrodynamic radius, and macromolecular coil volume. For a sulfonated sample synthesized for high mineralization and reservoir temperature conditions, the Huggins constant decreases with a simultaneous increase in the Kuhn segment (hardness), indicating good affinity between the polymer and solvent and the applicability of PAM under the selected conditions. This method for determining solubility and stability under challenging reservoir conditions can be recommended in addition to the method for determining the stability coefficient by measuring the screen factor or dynamic viscosity.

## Введение

При реализации проектов химических методов увеличения нефтеотдачи (ХМУН) на осложненных пластах исследователи сталкиваются с выпадением макромолекул из общего объема раствора вследствие их связывания с двухвалентными катионами и повы-

шенным содержанием нерастворенных частиц полимера, что влечет за собой коагуляцию призабойной зоны пласта и потерю эффекта от заводнения. Исследование процессов растворения макромолекул в низкомолекулярных растворителях несет в себе важный характер не только для определения молекулярных характеристик, но и для понятия причин отсутствия перехода от конформации «глобула» к конформации

«клубок» и снижения степени отрицательного взаимодействия полимера с катионами двухвалентных металлов. Растворение начинается с процесса набухания, которое подразделяется на ограниченное и неограниченное (характерно для макромолекул полиакриламида (ПАА)). В рамках неограниченного набухания молекулы воды диффундируют в макромолекулу полимера и увеличивают массу и объем клубка до полного растворения (рис. 1).



**Рис. 1 – Процесс растворения полимера в низкомолекулярном растворителе**

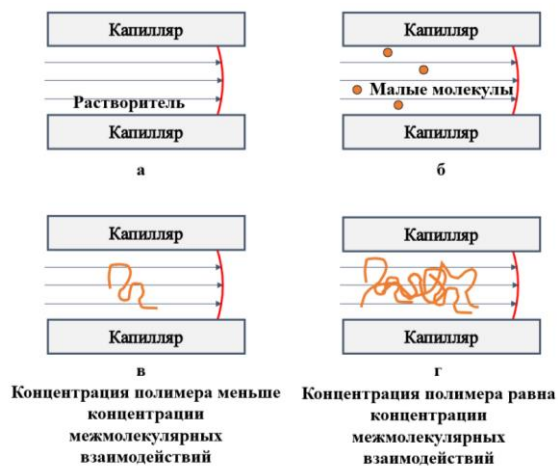
**Fig. 1 – The process of dissolving a polymer in a low-molecular-weight solvent**

В целом процесс растворения полимера в растворителе описывается двумя теориями: Гильдебранда-Скетчарда и Флори-Хаггинса [1]. Данные теории позволяют оценить степень взаимодействия системы растворитель-полимер и растворяющую способность растворителя. В рамках теории Флори-Хаггинса экспериментально определяется одноименная константа  $\chi$  для каждой пары полимер-растворитель, которая и указывает на их взаимное термодинамическое сродство [2]. Как правило, с увеличением константы качество растворителя ухудшается. Теория Гильдебранда-Скетчарда позволяет предсказывать растворимость полимера в данном растворителе по значениям параметров растворимости, которые для наилучшего растворения должны быть близки, то есть молярная энтальпия смешения должна стремиться к нулю.

Методы капиллярной вискозиметрии (рис. 2) позволяют рассчитывать характеристическую вязкость, молекулярную массу и косвенно оценивать гидродинамический радиус, сегмент Куна и константу Хаггинса для системы полимер-растворитель, что дает возможность определять растворимость полиакриламида в пластовой воде и степень химической деструкции.

Традиционно в литературе [3] и при реализации проектов ХМУН [4, 5] стабильность полимерного раствора в пластовой воде или при пластовой температуре оценивается по значениям потери динамической вязкости при постоянной скорости сдвига (как правило, принято 6 RPM или  $7,34 \text{ c}^{-1}$ ) [6, 7] или расчетом коэффициента стойкости к деструкции через параметр скрин-фактор [8]. Для этого растворы ПАА термостатируют при пластовой температуре в течение 7, 14, 28 и т.д. дней с мониторингом вышеуказанных параметров [9]. Существуют методы оценки солейстойкости сополимеров акриламида фотометрически по изменению коэффициента светопропускания при длине волны  $\lambda = 255 \text{ нм}$  [10, 11]. Однако, данные

методики всецело не учитывают деструкцию полимера при повышении минерализации воды и сшивание макромолекулы при контакте с двухвалентными катионами. Влияние пластовой воды на макромолекулу ПАА можно оценить вискозиметрическим методом через расчет таких параметров, как сегмент Куна, константа Хаггинса, гидродинамический радиус и объем.



**Рис. 2 – Процесс прохождения молекул через капилляр вискозиметра (а – растворителя, б – малых молекул, в – макромолекулы в разбавленном растворе, г – макромолекулы в концентрированном растворе)**

**Fig. 2 – The process of molecules passing through the viscometer capillary (a – solvent; b – small molecules; c – macromolecules in a dilute solution; d – macromolecules in a concentrated solution)**

В рамках изучения физики полимеров многие исследователи определяют вышеперечисленные характеристики вискозиметрическим методом или статистическим, динамическим светорассеянием [12]. Сегмент Куна определялся для полиимидов [13] по модели свободно-сочлененной цепи, для сополимеров на основе терпенов и метакриловой кислоты [14], сополимеров эпоксидных и полиэфирных смол [15] по объемной доли набухшего полимера. Константу Хаггинса полимера, синтезированного на мицеллах додецилсульфата натрия рассчитывали, как отношение тангенса угла наклона концентрационной зависимости приведенной вязкости к квадрату характеристической вязкости [16]. Определение степени деструкции полимера при помощи измерения динамической вязкости или скрин-фактора предлагается дополнить такими физическими параметрами макромолекулы, как константа Хаггинса, сегмент Куна, гидродинамический объем и радиус.

В данной работе были проведены вискозиметрические исследования растворов анионных ПАА для изучения конформационных превращений макромолекулы при повышении минерализации воды и концентрации двухвалентных катионов для анализа деструкции ПАА.

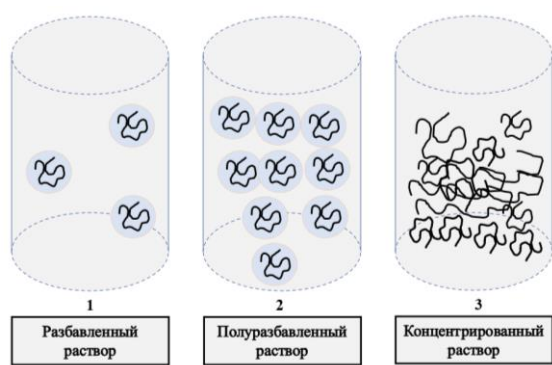


Рис. 3 – Схема изображения расположения макромолекул в зависимости от концентрации полимера (1 – разбавленный раствор, 2 – полуразбавленный раствор, 3 – концентрированный раствор)

Fig. 3 – Schematic representation of the arrangement of macromolecules as a function of polymer concentration (1 – dilute solution, 2 – semi-dilute solution, 3 – concentrated solution)

Концентрация исходного раствора полимера подбиралась таким образом, чтобы снизить вероятность соприкосновения молекулярных клубков и устранить эффект межмолекулярного взаимодействия (разбавленный раствор, рис. 3). Отсутствие взаимного перекрывания макромолекул позволяет определять индивидуальные характеристики каждой цепи [17-18].

### Методы исследования

В данной работе оценивали физико-химические параметры растворов анионных сополимеров акриламида методом капиллярной вискозиметрии в трех водах, отличающиеся между собой минерализацией. Стоит отметить, что данный метод не является абсолютным, а лишь непосредственно позволяет определить отношение размеров макромолекулы к её массе, но не сами абсолютные значения размеров и массы.

Выбранные полимеры отличаются между собой молекулярной массой, составом и, соответственно, стойкостью к высокой минерализации пластовой воды. ПАА-1 является низкомолекулярным (3-4 МДа) гидрофобно-модифицированным полимером. ПАА-2 является высокомолекулярным (11-13 МДа) гидролизированным (степень гидролиза 8-12%) представителем. ПАА-3 является высокомолекулярным сульфированным (степень сульфирования 15%) сополимером, молекулярная масса которого находится в диапазоне от 15 до 17 МДа и содержит в себе акриламид, акрилат натрия и 2-акриламидо-2-метилпропансульфоновую кислоту [19].

Порошок полимера растворяли в трех типах модельной воды: Тип I – пресной (0,14 г/л хлорида натрия и 0,18 г/л хлорида кальция), Тип II – 30 г/л хлорид натрия, Тип III – пластовая вода хлоркальциевого типа (общая минерализация – 170 г/л; содержит соли хлорида натрия, калия, кальция, магния, аммония, бромид натрия). Далее при помощи капиллярного вискозиметра типа 1 (ВПЖ-1) определялось время истечения для разбавленных растворов каж-

дого полимера. При помощи константы вискозиметра определяли кинематическую, удельную и приведенные вязкости. Характеристическая вязкость рассчитывалась экстраполяцией к нулевой концентрации зависимости приведенной вязкости от концентрации.

Молекулярная масса полимера рассчитывалась по формуле Марка-Куна-Хаувинка (1).

$$[\eta] = KM^{\alpha} \quad (1)$$

где  $[\eta]$  – характеристическая вязкость (дл/г);  $\alpha$ ,  $K$  – экспериментальные значения констант для каждой системы полимер-растворитель.

Подробную информацию о конформации макромолекулы демонстрирует константа  $\alpha$ , которая изменяется в диапазоне от 0 до 2 (рис. 4). В расчетах молекулярной массы раствора ПАА значение  $\alpha$  принимается за 0,8, как для системы полимер-хороший растворитель [20-21].



Рис. 4 – Конформация макромолекул в зависимости от параметра  $\alpha$

Fig. 4 – Conformation of macromolecules as a function of the parameter  $\alpha$

Гидродинамический радиус ( $R_h$ ) был рассчитан в соответствии с преобразованным уравнением расчета вязкости Эйнштейна (2), принимая гидратированные молекулы полимера в виде эквивалентных гидродинамических сфер, которые увеличивали бы вязкость в той же степени, что и твердые сферические частицы объем [22].

$$R_h = \left( \frac{3[\eta]M}{10\pi N} \right)^{1/3} \quad (2)$$

где  $M$  – молекулярная масса полимера (г/моль),  $N$  – число Авогадро,  $[\eta]$  – характеристическая вязкость (дл/г).

Константа Хаггинса ( $K_h$ ) характеризует поведение изолированных макромолекул в растворе и интенсивность взаимодействия в системе полимер-растворитель, а именно чем ниже константа, тем лучше растворитель. Значение константы Хаггинса ( $K_h$ ) рассчитывается по уравнению Хаггинса (3) для разбавленных растворов полимеров [23]:

$$\eta_{пр} = [\eta] + K_h[\eta]^2 C \quad (3)$$

где  $K_h$  – константа Хаггинса,  $\eta_{пр}$  – приведенная вязкость,  $C$  – концентрация полимера (г/дм<sup>3</sup>),  $[\eta]$  – характеристическая вязкость (дл/г).

Жесткость или гибкость макромолекулы можно определить по сегменту Куна ( $L_c$ ), ПАА должен обладать значением сегмента Куна менее 10 нм, [1] поскольку макромолекулы данного полимера являются гибкоцепными. Сегмент Куна ( $L_c$ ) рассчитывали по уравнению (4):

$$L_c = \frac{0,33\mu[\eta]}{b\Phi \sin^2 \frac{\varphi}{2} V_k^{1/3}} \quad (4)$$

где:  $\mu$  – молярная масса мономерного звена сополимера акриламида (кг/моль);  $b=1,54 \cdot 10^{-10}$  – длина углеродной связи в основной цепи макромолекулы (м);  $\Phi=2,1 \cdot 10^{21}$  – постоянная Флори-Фокса;  $\varphi=109^\circ$  – валентный угол между ковалентными связями основной цепи [24];  $[\eta]$  – характеристическая вязкость (дл/г);  $V_k$  – объем макромолекулярного клубка ( $\text{м}^3$ ).

### Результаты и обсуждение

Методом капиллярной вискозиметрии [9, 25-27] определены характеристические вязкости для анионных сополимеров акриламида и рассчитаны молекулярные массы (табл. 1). При сопоставлении данных от производителей и рассчитанных значений выявляется небольшое отклонение от заявленных параметров, что может указывать на разность методов определения, поскольку на текущий момент наиболее точным и распространенным подходом является гельпроникающая хроматография. Однако, стоит отметить, что порядки значений молекулярных масс сохраняются, что указывает на правильность проведенных измерений.

**Таблица 1 – Расчетные значения характеристической вязкости и средневязкостной молекулярной массы**

**Table 1 – Calculated Values of Characteristic Viscosity and Average Viscosity Molecular Weight**

| № | Полимер | Характеристическая вязкость $[\eta]$ , дл/г | Молекулярная масса $M_n$ , МДа |
|---|---------|---------------------------------------------|--------------------------------|
| 1 | ПАА-1   | 6,69                                        | 3,35                           |
| 2 | ПАА-2   | 17,52                                       | 11,17                          |
| 3 | ПАА-3   | 27,42                                       | 19,17                          |

В таблицах 2, 3, 4:  $R_h$  – гидродинамический радиус макромолекулы,  $L_c$  – сегмент Куна,  $K_h$  – константа Хаггинса,  $V_k$  – гидродинамический объем макромолекулы.

Из табл. 2 можно предположить, что для образца ПАА-1 при увеличении количества одновалентных солей с переходом от растворителя типа I к типу II константа Хаггинса  $K_h$  увеличивается, что говорит о низкой стойкости данного полимера к повышению минерализации. Снижение сегмента Куна  $L_c$  характеризует о повышении гибкости макромолекулы и недостаточном взаимодействии полимера с растворителем. При этом гидродинамический радиус полимера  $R_h$  уменьшается равным образом, что говорит о деструкции образца.

**Таблица 2 – Расчетные физико-химические параметры ПАА-1 при повышении минерализации воды**

**Table 2 – Calculated physicochemical parameters of PAA-1 as water salinity increases**

| № | Тип воды | $R_h$ , нм | $L_c$ , нм | $K_h$ | $V_k$ , $\text{м}^3$  |
|---|----------|------------|------------|-------|-----------------------|
| 1 | I        | 3564,97    | 6,0        | 0,20  | $2,91 \cdot 10^{-18}$ |
| 2 | II       | 708,75     | 4,5        | 4,51  | $2,28 \cdot 10^{-18}$ |
| 3 | III      | -*         |            |       |                       |

\* полимер в условиях высокой минерализации деструктировал.

Для полимера ПАА-2 (табл. 3) повышение минерализации приводит (с переходом от растворителя Типа I к Типу III) к снижению гидродинамического радиуса  $R_h$  и объема клубка  $V_k$  макромолекулы, вероятно, вследствие разрыва С-С связи, и к повышению константы Хаггинса  $K_h$ , что указывает на ухудшение качества растворителя (повышение минерализации воды и степени деструкции макромолекулы) для полимера. Однако, было установлено, что при дальнейшем увеличении минерализации происходит снижение константы Хаггинса при одновременном увеличении сегмента Куна  $L_c$ , что указывает на повышение интенсивности взаимодействия полимера с растворителем. Увеличение жесткости макромолекулы – как правило следствие «укрепления» гидратной оболочки цепи гидратированными катионами соли. Константа Хаггинса для полимера ПАА-2 находится на уровне 0,25-0,31, что указывает на хорошее сродство с растворителем [16].

**Таблица 3 – Расчетные физико-химические параметры ПАА-2 при повышении минерализации воды**

**Table 3 – Calculated physicochemical parameters of PAA-2 as water salinity increases**

| № | Тип воды | $R_h$ , нм | $L_c$ , нм | $K_h$ | $V_k$ , $\text{м}^3$  |
|---|----------|------------|------------|-------|-----------------------|
| 1 | I        | 4933,36    | 6,7        | 0,25  | $7,70 \cdot 10^{-17}$ |
| 2 | II       | 1459,00    | 2,1        | 0,31  | $1,99 \cdot 10^{-17}$ |
| 3 | III      | 1055,45    | 5,2        | 0,26  | $1,06 \cdot 10^{-18}$ |

**Таблица 4 – Расчетные физико-химические параметры ПАА-3 при повышении минерализации воды**

**Table 4 – Calculated physicochemical parameters of PAA-3 as water salinity increases**

| № | Тип воды | $R_h$ , нм | $L_c$ , нм | $K_h$ | $V_k$ , $\text{м}^3$  |
|---|----------|------------|------------|-------|-----------------------|
| 1 | I        | 7424,57    | 2,1        | 0,23  | $2,62 \cdot 10^{-16}$ |
| 2 | II       | 2017,42    | 2,99       | 0,20  | $5,26 \cdot 10^{-17}$ |
| 3 | III      | 1488,43    | 7,7        | 0,13  | $2,11 \cdot 10^{-17}$ |

В табл.4 приведены данные для ПАА-3. Как было упомянуто выше, данный полимер является термо- и солестойким и синтезирован под условия осложненных пластов. Двухвалентные катионы присутствуют в растворе пресной воды (Тип I), однако, наличие соли 2-акриламида-2-метилпропансульфоновой кислоты защищает амидную часть от связывания с ионом кальция. В пресной воде (Тип I) у полимера отслеживается достаточно большой гидродинамический радиус  $R_h$  и объем клубка  $V_k$ , константа Хаггинса  $K_h$  находится ниже 0,3, что указывает на минимальные деструктирующие факторы (контакт с двухвалентными катионами) для ПАА. При незначительном повышении минерализации (переход к воде Типа II) гидродинамический радиус и объем клубка снижаются, но снижается константа Хаггинса и повышается сегмент Куна  $L_c$ , что указывает на повышение интенсивности взаимодействия полимера с растворителем. При растворении ПАА-3 в воде высокой минерализации (Тип III) снижается гидродинамический

радиус макромолекулы и его объем клубка, однако, происходит снижение константы Хаггинса и повышения сегмента Куна, что указывает на большее сродство и интенсивность взаимодействия в системе полимер-растворитель.

Таким образом, значение сегмента Куна для трех образцов ПАА находятся менее 10 нм, что указывает на гибкоцепной характер макромолекулы. Константа Хаггинса для полимеров в растворителях Типа I, II, III преимущественно находится на уровне 0,1-0,3, соответственно, наличие избыточного количества двухвалентных катионов в воде Типа III не препятствует растворению полимера.

### Заключение

По результатам вискозиметрических тестов сформированы следующие особенности процесса растворения анионных сополимеров акриламида в различных водах:

1. Растворение ПАА – следствие его неограниченного набухания в воде [28];
2. Вискозиметрический метод оценки параметров растворимости полимера является относительной формой оценки данных величин;
3. Повышение минерализации затворяемой воды приводит к снижению характеристической вязкости, молекулярной массы, гидродинамического радиуса и объема клубка макромолекул;
4. При переходе к другому типу растворителя снижение константы Хаггинса при одновременном увеличении сегмента Куна (жесткости) указывает на интенсивное взаимодействие системы полимер-растворитель.
5. Сульфированный ПАА синтезирован под условия высокой минерализации и пластовой температуры, поэтому растворение данного образца в высокоминерализованной воде логично приводит к снижению молекулярной массы, гидродинамического радиуса и объема клубка. Главной выявленной особенностью полимера является одновременное повышение сегмента Куна и снижение константы Хаггинса, что указывает на хорошее сродство полимера и растворителя.

### Литература

1. Д. Н. Давлюд, П. Д. Воробьев, Ю. В. Матрунчик, Е. В. Воробьева, Н.П. Крутько, *Вест. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. хим. наук*, 54, 3, 329–337 (2018). DOI: 10.29235/1561-8331-2018-54-3-329-337.
2. P.J. Flory, *Principles of Polymer Chemistry*. Cornell University Press, New York, 1953, 672 с.
3. И. И. Бачурин, А. П. Лосев, Я.Л. Савельева, *Бурение и нефть*, 7, (2025). DOI: 10.62994/2072-4799.2025.35.37.009.
4. API RP 63-1990 «Американского нефтяного института».
5. Руководство по проектированию и технико-экономическому анализу разработки нефтяных месторождения с применением метода полимерного воздействия на пласт, РД-39-0148311-206-85, 1985.
6. А.О. Чекан, А.А. Кудряшов, Д.А. Господарев, Лымарь И.В., Цыганков А.О., *Литасфера*, 1, 60, 154-174 (2024).
7. Г.М. Мостаджеран, дисс. на соиск. канд. техн. Наук, РГУ нефти и газа (НИУ) им. И.М. Губкина, Москва, 2021. 159 с.

8. А. В. Кладова, Н. А. Черепанова, Е. В. Шамсутдинова, *Нефтепромысловое дело*, 10, 63-67 (2018). – DOI 10.30713/0207-2351-2018-10-63-67.
9. Л.И. Толстых, Л.Ф. Давлетшина, К.А. Потешкина, *Полиакриламид в процессах нефтегазодобычи*, РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М.Губкина, Москва, 2023, 136 с.
10. Е. А. Зотова, А. И. Нечаев, *Химия. Экология. Урбанистика*, 377-380 (2017).
11. А. И. Нечаев, И. И. Лебедева, В. А. Вальцифер, В. Н. Стрельников, *Журнал прикладной химии*, 89, 8, 1047-1053 (2016).
12. Е.Е. Бибик, Е. В. Сивцов, *Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета)*, 68, 94, 50-52 (2024).
13. А. Г. Борисов, Д. В. Вертянов, Е. В. Ильяшева, Н. Г. Осипенкова, С. П. Тимошенко, *Известия высших учебных заведений. Электроника*, 30, 5, 566-574 (2025).
14. А. Д. Воробьев, С. В. Буча, Е. В. Воробьева, Н. П. Крутько, Ю. В. Липай, М. А. Астахова, *Известия Национальной академии наук Беларуси. Серия химических наук*, 59, 2, 115-124 (2023).
15. И.Н. Вихарева, П.А. Кручинина, Д.В. Николаев, И.Т. Шарапова, *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Химия*, 17, 2, 177-182 (2025). DOI: 10.14529/chem250211.
16. Д. С. Быков, Ю. В. Шулевич, Т. П. Богданова Е. Г. Духанина, А. В. Навроцкий, И. А. Новаков, *Волгоградский государственный технический университет*, 136-144 (2024) DOI: 10.35211/1990-5297-2024-12-295-136-144
17. K. Dua, P. Kumbhar, S. Nadaf, A. Manjappa, P. Karade, U. Mali, S. K. Singh, J. Disouza, V. Patravale, *Polymers for Pharmaceutical and Biomedical Applications*, с. 131-151 (2024). DOI: 10.1016/B978-0-323-95496-9.00004-1.
18. S. Agarwal, A. Mahmood, R. Ramprasad, *ACS Materials Letters*, 7, 6, 2017-2023 (2025). DOI:10.1021/acsmaterialslett.5c00054.
19. О.А. Антонович. Автореф. дисс. канд. хим. наук, КГТУ (КНИТУ), Казань, 2005. 18 с.
20. А.А. Тагер, *Физико-химия полимеров*. Научный мир, Москва, 2007, 573 с.
21. Z. Li, F. Lu, Y. Liu, *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 71, 27, 10238-10249 (2023). DOI: 10.1021/acs.jafc.3c01162.
22. Н. Li, *Smart Hydrogel Modelling*. Springer Singapore, Nanyang, 2009, 359 с.
23. K. Dusek, *Science of Gel*. Springer Singapore, Prague, 2026, 556 с.
24. О. М. Жилина, Л. П. Мыкоц, Н.Н. Степанова, *Медико-фармацевтический журнал «Пульс»*, 20, 12, С. 204-209 (2018).
25. Р.А. Эшчанов, Ш.Б. Хасанов, М.Р. Ибрагимов, *Academic research in educational sciences*, 3, 4, 1018-1048 (2022).
26. И.Н. Вихарева, П.А. Кручинина, Д.В. Николаев, И.Т. Шарапова, *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Химия*, 17, 2, 177-182 (2025). DOI: 10.14529/chem250211.
27. Ш. Н. Киёмов, А. Т. Джалилов, *Universum: химия и биология*, 7 (109), 39-43 (2023). DOI: 10.32743/UNI-CHEM.2023.109.7.15724.
28. А. О. Мидько, *E-Scio*, 3 (78), 448-466 (2023).

### References

1. D. N. Davlyud, P. D. Vorobyov, Yu. V. Matrunchik, E. V. Vorobyova, N. P. Krutko, *Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Series: Chemical Sciences*, 54, 3, 329–337 (2018). DOI: 10.29235/1561-8331-2018-54-3-329-337.
2. P. J. Flory, *Principles of Polymer Chemistry*. Cornell University Press, New York, 1953, 672 pp.

3. I. I. Bachurin, A. P. Losev, Y. L. Savelyeva, *Drilling and Oil*, 7, (2025). DOI: 10.62994/2072-4799.2025.35.37.009.
4. API RP 63-1990 of the American Petroleum Institute.
5. Guidelines for the Design and Technical-Economic Analysis of Oil Field Development Using the Polymer Formation Treatment Method, RD-39-0148311-206-85, 1985.
6. A.O. Chekan, A.A. Kudryashov, D.A. Gospodarev, I.V. Lyamar, A.O. Tsygankov, *Litasfera*, 1, 60, 154–174 (2024).
7. G.M. Mostadjeran, Ph.D. thesis in Technical Sciences, I.M. Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University), Moscow, 2021. 159 pp.
8. A. V. Kladova, N. A. Cherepanova, E. V. Shamsutdinova, *Oilfield Engineering*, 10, 63–67 (2018). – DOI 10.30713/0207-2351-2018-10-63-67.
9. L. I. Tolstykh, L. F. Davletshina, K. A. Poteschkina, *Polyacrylamide in Oil and Gas Production Processes*, Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University), Moscow, 2023, 136 pp.
10. E. A. Zotova, A. I. Nechaev, *Chemistry. Ecology. Urban Studies*, 377–380 (2017).
11. A. I. Nechaev, I. I. Lebedeva, V. A. Valtsifer, V. N. Strelnikov, *Journal of Applied Chemistry*, 89, 8, 1047–1053 (2016).
12. E. E. Bibik, E. V. Sivtsov, *Proceedings of the St. Petersburg State Technological Institute (Technical University)*, 68, 94, 50–52 (2024).
13. A. G. Borisov, D. V. Vertyanov, E. V. Ilyasheva, N. G. Osipenko, S. P. Timoshenkov, *Proceedings of Higher Educational Institutions. Electronics*, 30, 5, 566–574 (2025).
14. A. D. Vorobyov, S. V. Bucha, E. V. Vorobyova, N. P. Krutko, Yu. V. Lipay, M. A. Astakhova, *Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Chemical Sciences Series*, 59, 2, 115–124 (2023).
15. I. N. Vikhareva, P. A. Kruchinina, D. V. Nikolaev, I. T. Sharapova, *Bulletin of South Ural State University. Series: Chemistry*, 17, 2, 177–182 (2025). DOI: 10.14529/chem250211.
16. D. S. Bykov, Yu. V. Shulevich, T. P. Bogdanova, E. G. Dukhanina, A. V. Navrotsky, I. A. Novakov, *Volgograd State Technical University*, 136–144 (2024) DOI: 10.35211/1990-5297-2024-12-295-136-144
17. K. Dua, P. Kumbhar, S. Nadaf, A. Manjappa, P. Karade, U. Mali, S. K. Singh, J. Disouza, V. Patravale, *Polymers for Pharmaceutical and Biomedical Applications*, pp. 131–151 (2024). DOI: 10.1016/B978-0-323-95496-9.00004-1.
18. S. Agarwal, A. Mahmood, R. Ramprasad, *ACS Materials Letters*, 7, 6, 2017–2023 (2025). DOI:10.1021/acsmaterialslett.5c00054.
19. O.A. Antonovich. Abstract of Ph.D. thesis in Chemistry, Kazan State Technical University (KSTU), Kazan, 2005. 18 pp.
20. A.A. Tagher, *Physical Chemistry of Polymers*. Nauchny Mir, Moscow, 2007, 573 pp.
21. Z. Li, F. Lu, Y. Liu, *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 71, 27, 10238–10249 (2023). DOI: 10.1021/acs.jafc.3c01162.
22. H. Li, *Smart Hydrogel Modeling*. Springer Singapore, Nan-yang, 2009, 359 pp.
23. K. Dusek, *Science of Gel*. Springer Singapore, Prague, 2026, 556 pp.
24. O. M. Zhilina, L. P. Mykots, N. N. Stepanova, *Medical and Pharmaceutical Journal "Pulse"*, 20, 12, pp. 204–209 (2018).
25. R. A. Eshchanov, Sh. B. Khasanov, M. R. Ibragimova, \*Academic Research in Educational Sciences\*, 3, 4, 1018–1048 (2022).
26. I. N. Vikhareva, P. A. Kruchinina, D. V. Nikolaev, I. T. Sharapova, *Bulletin of South Ural State University. Series: Chemistry*, 17, 2, 177–182 (2025). DOI: 10.14529/chem250211.
27. Sh. N. Kiyomov, A. T. Dzhalilov, *Universum: Chemistry and Biology*, 7 (109), 39–43 (2023). DOI: 10.32743/UNICHEM.2023.109.7.15724.
28. A. O. Midko, *E-Scio*, 3 (78), 448–466 (2023).

© **М. А. Силин** – доктор химических наук, профессор, заведующий кафедрой Технологии химических веществ для нефтяной и газовой промышленности (ТХВНГП), РГУ нефти и газа (НИУ) им. И.М. Губкина, Москва, Россия, silin.m@gubkin.ru; **Л. А. Магадова** – доктор технических наук, профессор кафедры ТХВНГП, директор, зав. лабораторией НОЦ "Промысловая химия", РГУ нефти и газа (НИУ) им. И.М. Губкина, lubmag@gmail.com; **Л. Р. Газалеева** – аспирант кафедры ТХВНГП, РГУ нефти и газа (НИУ) им. И.М. Губкина, gazaleeva.liana1999@gmail.com.

© **М. А. Silin** – Doctor of Sciences (Chemical Sci.), Professor, Head of the Department of Chemical Technology for the Oil and Gas Industry (CTOGI), Russian State University of Oil and Gas (NRU) named I.M. Gubkin (Gubkin RSU of Oil and Gas), Moscow, Russia, silin.m@gubkin.ru; **L. A. Magadova** – Doctor of Sciences (Technical Sci.), Professor of the CTOGA department, Director, Head of the Laboratory of the Scientific Research Center "Field Chemistry", Gubkin RSU of Oil and Gas, lubmag@gmail.com; **L. R. Gazaleeva** – PhD-student of the CTOGA department, Gubkin RSU of Oil and Gas, gazaleeva.liana1999@gmail.com.

Дата поступления рукописи в редакцию – 19.05.26.

Дата принятия рукописи в печать – 16.06.26.