

СТРУКТУРНО-МЕХАНИЧЕСКИЕ (РЕОЛОГИЧЕСКИЕ) СВОЙСТВА ГЕЛЯ НА ОСНОВЕ ПОЛИВИНИЛОВОГО СПИРТА

И.С. Кожевников, М.С. Фуфаева

Иван Сергеевич Кожевников (ORCID 0000-0003-2505-2002)*, Мария Сергеевна Фуфаева (ORCID 0000-0003-4252-7786)

Лаборатория коллоидной химии нефти, Институт химии нефти СО РАН, Академический пр., 4, Томск, Российская Федерация, 634055

E-mail: www.tsu@gmail.com*, maria81@ipc.tsc.ru

В настоящей работе исследованы структурно-механические (реологические) свойства гелеобразующей системы, содержащей поливиниловый спирт (гелеобразователь) и щелочную композицию на основе неорганической буферной системы и полиола (сшиватель). Реологические измерения проводили на реометре Haake Viscotester iQ, оснащенном измерительной системой коаксиальных цилиндров CC25, контроль температуры осуществлялся встроенным в реометр элементом Пельтье. В осцилляционном режиме, при частоте колебаний ротора 1 Гц получены амплитудные развертки для сформированного из исходных составов геля, определен LVE-диапазон. Затем, в режиме с контролируемой деформацией, при значении деформации 0,1 из диапазона линейной вязкоупругости, получены кинетические зависимости модуля упругости G' , модуля потерь G'' и комплексной вязкости $|\eta^|$ для составов, отличающихся соотношением компонентов сшивателя при комнатной температуре. Показано, что во всех исследованных системах в начальные моменты времени наблюдается резкий рост реологических характеристик – гель начинает образовываться уже в момент смешивания компонентов. Далее, с течением времени, скорость возрастания G' , G'' и $|\eta^*|$ снижается, а реокинетические кривые выходят на практически горизонтальный участок – во всем объеме образца формируется трехмерная структура – гель. Установлено, что регистрируемые кривые в условиях эксперимента изменяются симбатно, а соотношение компонент комплексного модуля связано с концентрацией сшивателя. Для композиции с повышенной концентрацией сшивателя у формирующейся структуры преобладают упругие свойства ($G' > G''$), при этом, по сравнению с менее концентрированным составом сшивателя, возрастает прочность структуры, а регистрируемые значения компонент комплексного модуля отличаются на порядок.*

Ключевые слова: гель, модуль упругости, осцилляционная реометрия, поливиниловый спирт

STRUCTURAL-MECHANICAL (RHEOLOGICAL) PROPERTIES OF A GEL BASED ON POLYVINYL ALCOHOL

I.S. Kozhevnikov, M.S. Fufaeva

Ivan S. Kozhevnikov (ORCID 0000-0003-2505-2002)*, Maria S. Fufaeva (ORCID 0000-0003-4252-7786)

Laboratory of Petroleum Colloidal Chemistry, Institute of Petroleum Chemistry of SB of the RAS, Akademicheskiiy ave., 4, Tomsk, 634055, Russia

E-mail: www.tsu@gmail.com*, bav@ipc.tsc.ru

In this work, the structural-mechanical (rheological) properties of a gel-forming system containing polyvinyl alcohol (gelling agent) and an alkaline composition based on an inorganic buffer system and a polyol (cross-linking agent) were studied. Rheological measurements were carried out on a Haake Viscotester iQ rheometer equipped with a CC25 coaxial cylinder measuring system. Temperature control was carried out by a Peltier element built into the rheometer. In the oscillatory mode, at a rotor oscillation frequency of 1 Hz, amplitude sweeps were obtained for the gel formed from the initial compositions, and the LVE range was determined. Then, in the strain-

controlled mode, at a strain value of 0.1 from the range of linear viscoelasticity, the kinetic dependences were obtained for the elastic modulus G' , loss modulus G'' and complex viscosity $|\eta^|$ for compositions that differ in the ratio of crosslinker components at room temperature. It was shown that in all studied systems, at the initial moments of time, a sharp increase in rheological characteristics is observed - a gel begins to form already at the moment of mixing the components. Further, over time, the rate of increase in G' , G'' and $|\eta^*|$ decreases, and the rheokinetic curves reach an almost horizontal section - a three-dimensional structure - a gel - is formed in the entire volume of the sample. It was found that the recorded curves change symbatically under experimental conditions, and the ratio of the components of the complex module is related to the concentration of the crosslinker. For a composition with an increased crosslinker concentration, the elastic properties of the emerging structure predominate ($G' > G''$), while, compared to a less concentrated crosslinker composition, the strength of the structure increases, and the recorded values of the components of the complex modulus differ by an order of magnitude.*

Keywords: gel, elastic modulus, oscillatory rheometry, polyvinyl alcohol

Для цитирования:

Кожевников И.С., Фуфаева М.С. Структурно-механические (реологические) свойства геля на основе поливинилового спирта. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2025. Т. 68. Вып. 8. С. 20–25. DOI: 10.6060/ivkkt.20256808.4t.

For citation:

Kozhevnikov I.S., Fufaeva M.S. Structural-mechanical (rheological) properties of a gel based on polyvinyl alcohol. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2025. V. 68. N 8. P. 20–25. DOI: 10.6060/ivkkt.20256808.4t.

ВВЕДЕНИЕ

Гелеобразующие составы (ГОС) широко применяются в различных областях народного хозяйства – нефтедобывающей, медицинской, в производстве различных конструкционных материалов, в биотехнологии и др. В химической технологии большую группу составляют процессы, основанные на методах получения (синтеза) материалов, существенным элементом которых является образование геля на одной из стадий процесса (так называемые «золь-гель процессы»).

ГОС применяются в рамках физико-химических методов повышения нефтеотдачи [1-5], для гидроразрыва пласта [6-10]. Известны составы, образующие гель при смешивании компонентов (добавлении сшивателя), при изменении температуры, либо при воздействии комплекса факторов. Например, растворы метилцеллюлозы образуют гель при нагревании, водные растворы поливинилового спирта образуют криогели после цикла замораживание - оттаивание, а при добавлении сшивателей гели образуются при положительных температурах [11-15].

При изучении гелеобразующих систем существует потребность в контроле реологических свойств системы, характеризующих формирующуюся структуру, а также кинетику золь-гель перехода. Методы, основанные на колебательном режиме движения пробного тела, предпочтительны с

точки зрения неразрушения формирующейся структуры. К ним относятся реометры, работающие в режиме осцилляции [16, 17], и вибрационные вискозиметры [18-21]. На сегодняшний день серийно выпускаются реометры (Haake, Anton Paar и др.), которые позволяют проводить измерения как в ротационном, так и в осцилляционном режимах, могут быть использованы для контроля кинетики нарастания вязкоупругих свойств образца в процессе гелеобразования, а также для определения структурно-механических характеристик геля [22-24].

В настоящей работе в осцилляционном режиме исследованы кинетика структурообразования и реологические свойства геля на основе поливинилового спирта [23, 24].

ТЕХНИКА И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

В работе исследовали два гелеобразующих состава (ГОС-1 и ГОС-2), полученные на основе поливинилового спирта (ПВС) с молекулярной массой $M \sim 150 \cdot 10^3$ и состава ИХН-ПРО – щелочной композиции на основе неорганической буферной системы и полиола (разработка ИХН СО РАН, ТУ 2458-010-03534067-2013) [22]. Гель образуется в результате межмолекулярного взаимодействия водного раствора ПВС (гелеобразователь) с ИХН-ПРО (сшиватель) в диапазоне $T = 0-25$ °С. В проводимых экспериментах композицию ИХН-ПРО разбавляли дистиллированной водой в соотношении 1 : 20 (для ГОС-1) и 1 : 50 (для ГОС-2), смеси-

вали с 5% (по массе) водным раствором ПВС в соотношении 1 : 5 при комнатной температуре (23 °C).

Предварительные эксперименты (амплитудные развертки для сформировавшегося геля) и изучение кинетики гелеобразования проводили с помощью реологических измерений в режиме осцилляции на реометре НААКЕ Viscotester iQ при частоте 1 Гц с использованием измерительной системы коаксиальных цилиндров СС25; контроль температуры образца осуществлялся с помощью встроенного в реометр элемента Пельтье. Принцип реологических измерений в режиме осцилляции описан, например, в [12], а методика измерений – в документации к используемому реометру и программному обеспечению.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1 представлены амплитудные развертки для гелей сформированных ГОС-1 (а) и ГОС-2 (б). Видно, что зависимости G' и G'' параллельны горизонтальной оси при деформациях от 0,006 до 0,7 для ГОС-1 и при 0,02 до 2 для ГОС-2. Значение деформации 0,1 в обоих случаях попадает в LVE-диапазон, поэтому оно использовалось в кинетических экспериментах. Также видно, что во всем диапазоне линейной вязкоупругости у геля ГОС-1 преобладают упругие свойства ($G' > G''$), например, при значении деформации 0,1 $G' = 757$ Па, а $G'' = 414$ Па. Для ГОС-2 во всем LVE-диапазоне значения модулей G' и G'' близки, (при деформации 0,1 $G' = 115$ Па, а $G'' = 105$ Па). На рис. 2 представлены полученные в осцилляционном режиме кинетические зависимости реологических свойств ГОС-1 и ГОС-2 (зависимости модуля упругости (G'), модуля потерь (G'') и модуля комплексной вязкости ($|\eta^*|$) от времени при постоянной температуре (23 °C). Временные зависимости реологических свойств отражают кинетику процесса структурообразования, а также характеризуют сформировавшуюся структуру, поскольку используемый режим деформирования образца, основанный на колебательном движении пробного тела, не разрушает формирующийся гель. Регистрируемые реологические зависимости отражают физический процесс превращения жидкости в нетекущее твердообразное тело. На рис. 2, а представлены кинетические зависимости G' , G'' и $|\eta^*|$, полученные в режиме осцилляции при значении деформации 0,1 и частоте 1 Гц для геля на основе ГОС-1. На начальных участках зависимости G' , G'' и $|\eta^*|$ демонстрируют резкий рост – процесс образования геля начинается сразу после

смешения компонентов. При этом $G' > G''$ – у образца преобладают упругие свойства. Далее, с течением времени, скорость возрастания G' , G'' и $|\eta^*|$ снижается, кривые выходят на практически горизонтальный участок – во всем объеме образца формируется трехмерная структура – гель. Начало упомянутого участка можно рассматривать как время образования геля во всем объеме, которое в представленном масштабе составляет менее 1000 с. Далее, рассматриваемые величины возрастают существенно медленнее – сформировавшийся гель незначительно упрочняется.

Представленные на рис. 2 б, кинетические зависимости G' , G'' и $|\eta^*|$ для ГОС-2 (композиции с меньшим содержанием сшивателя), построенные в том же масштабе (по вертикальной оси), лежат ниже соответствующих кривых рис. 2 а, то есть реологические характеристики ГОС-2 существенно ниже по сравнению с ГОС-1, примерно на порядок; масштаб по вертикальной оси – логарифмический. При этом, кинетические характеристики процесса гелеобразования (профиль реологических кривых) для двух исследуемых составов схожи. Также как и ГОС-1, гель ГОС-2 начинает образовываться сразу после сливания компонентов, и в течение некоторого начального времени упрочняется. Также видим, что для ГОС-2 величины G' и G'' сопоставимы, а соответствующие кривые рис. 2 б в представленном масштабе практически совпадают. Для ГОС-1 величины G' и G'' , как было отмечено, отличаются существенно. Из данных рис. 1 и рис. 2 можно видеть, что соотношение компонент комплексного модуля связано с концентрацией сшивателя.

Для исследуемого типа систем величины G' , G'' и $|\eta^*|$ с течением времени изменяются симбатно (см. рис. 2). Сравним кинетику модуля упругости G' – величины, характеризующей гелеобразное состояние вещества, для исходного раствора, ГОС-1 и ГОС-2. Начальные фрагменты зависимостей представлены на рис. 3. Значение модуля упругости G' для исходного раствора полимера в представленном масштабе очень мало и постоянно, что вполне характерно для неструктурированного раствора полимера. В то же время, модуль G' для ГОС-1 и ГОС-2 в начальные моменты времени существенно возрастает вследствие структурирования, а спустя 200 с достигает 729 Па для ГОС-1 и 120 Па для ГОС-2. Гель, сформированный ГОС-1, более упругий, обладает лучшими структурно-механическими свойствами, поскольку концентрация сшивателя в ГОС-1 выше.

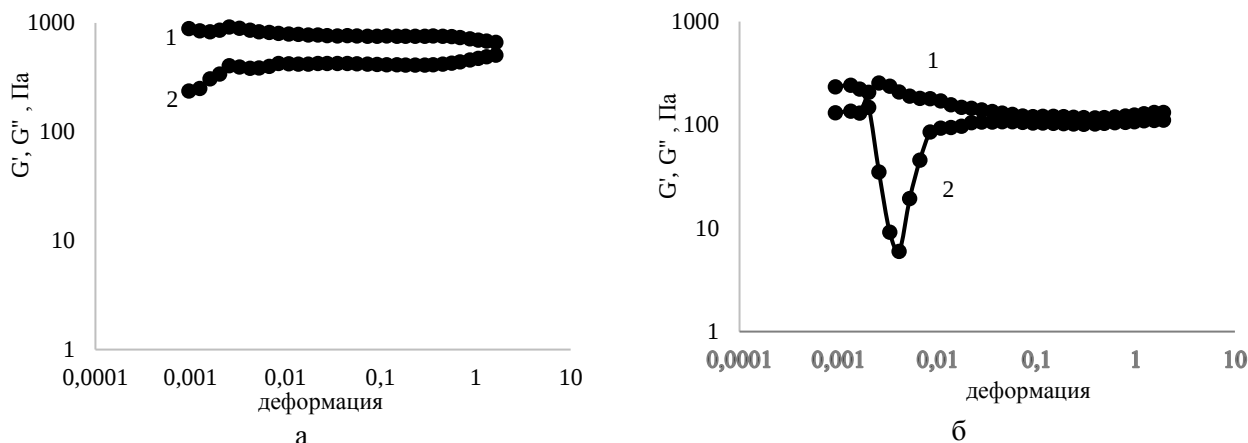


Рис. 1. Амплитудные развертки для гелей ГОС-1 (а) и ГОС-2(б), 1 - G' , 1 - G''
Fig. 1. Amplitude sweeps for gels of GFC-1(a) and GFC-2(б), 1 - G' , 1 - G''

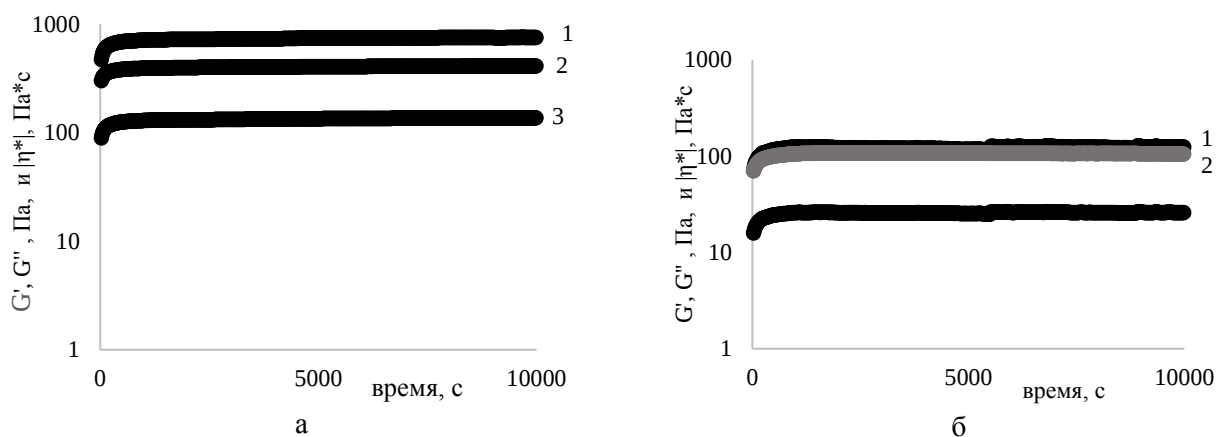


Рис. 2. Кинетика реологических свойств ГОС-1 (а) и ГОС-2 (б): 1 – модуль упругости (G'), 2 – модуль потерь (G'') и модуль комплексной вязкости ($|\eta^*|$)

Fig. 2. Kinetics of rheological properties of GOS-1 (a) and GOS-2 (б): 1 – elastic modulus (G'), 2 – loss modulus (G'') and complex viscosity modulus ($|\eta^*|$)

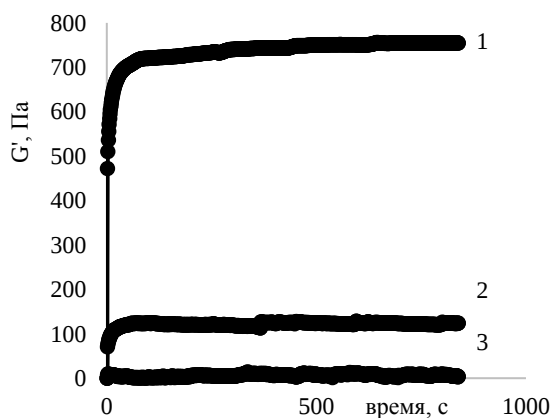


Рис. 3. Кинетика модуля упругости ГОС-1 (1), ГОС-2 (2) и исходного раствора гелеобразователя (3)

Fig. 3. Kinetics of the elastic modulus and GOS-1 (1), GOS-2 (2) and the initial solution of the gelling agent (3)

ВЫВОДЫ

Таким образом, в осцилляционном режиме исследованы кинетика структурообразования и реологические свойства геля поливинилового спирта и

щелочной композиции на основе неорганической буферной системы и полиола. Установлено, что реологические характеристики G' , G'' и $|\eta^*|$ в условиях эксперимента изменяются симбатно, а соотношение компонент комплексного модуля связано с концентрацией сшивателя. Для всех исследованных систем в начальный период наблюдается резкий рост реологических характеристик – гель начинает образовываться уже в момент смешивания компонентов. Далее, с течением времени, скорость возрастания G' , G'' и $|\eta^*|$ снижается, а реокINETические кривые выходят на плато – гель формируется во всем объеме образца. Для композиции с повышенной концентрацией сшивателя у формирующейся структуры преобладают упругие свойства ($G' > G''$), при этом возрастает прочность структуры по сравнению с менее концентрированным составом, а регистрируемые значения компонент комплексного модуля для исследованных систем отличаются на порядок.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в рамках государственного задания ИХН СО РАН, финансируемого Министерством науки и высшего образования Российской Федерации (НИОКТР № 121031500048-1).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

The work was carried out within the State Assignment for IPC SB RAS, financed by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (NIOKTR 121031500048-1).

The authors declare the absence of a conflict of interest warranting disclosure in this article.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Romero-Zeron L.** Chemical Enhanced Oil Recovery (cEOR) – a Practical Overview. London: InTechOpen Ltd. 2016. 200 p. DOI: 10.5772/61394.
2. **Муслимов Р.Х.** Нефтеотдача – прошлое, настоящее, будущее. Казань: изд-во «ФЭН». 2012. 664 с.
3. **Алтунина Л.К., Кувшинов В.А., Стасьева Л.А., Кувшинов И.В.** Тенденции и перспективы развития физико-химических методов увеличения нефтеотдачи месторождений тяжелой нефти. *Химия в интересах устойчивого развития*. 2018. Т. 26. № 3. С. 261–277. DOI: 10.15372/KhUR20180303.
4. **Кувшинов И.В., Кувшинов В.А., Алтунина Л.К.** Применение термотропных композиций для повышения нефтеотдачи. *Нефть. хоз-во*. 2017. № 1. С. 44–47.
5. **Alvarado V., Manrique E.** Enhanced oil recovery: An update review. *Energies*. 2010. V. 3. N 9. P. 1529–1575. DOI: 10.3390/en3091529.
6. **Al-Muntasheri G. A., Hussein I. A., Nasr-El-Din H. A., Mohamed Amin B.** Viscoelastic properties of a high temperature cross-linked water shut-off polymeric gel. *J. Pet. Sci. Eng.* 2007. V. 55. N 1–2. P. 56–66. DOI: 10.1016/j.petrol.2006.04.004.
7. **Battistel E., Bianchi D., Fornaroli M., Cobianco S.** Enzymes breakers for viscosity enhancing polymers. *J. Pet. Sci. Eng.* 2011. V. 77. N 1. P. 10–17. DOI: 10.1016/j.petrol.2011.02.003.
8. **Fink J.** Chap. 16. Gel breakers, Hydraulic Fracturing Chemicals and Fluids Technology. 2020. P. 205–222. DOI: 10.1016/B978-0-12-822071-9.00023-2.
9. **Sun X., Gao Z., Zhao M., Gao M., Mingyong D.U., Dai C.** Development and evaluation of a novel seawater-based viscoelastic fracturing fluid system. *J. Pet. Sci. Eng.* 2019. V. 183. N 4. P. 106408. DOI: 10.1016/j.petrol.2019.106408.
10. **Martyushev D.A., Govindarajan S.K.** Development and study of a Visco-Elastic Gel with controlled destruction times for killing oil wells. *J. King Saud Univ. Eng. Sci.* 2022. V. 34. N 7. P. 408–415. DOI: 10.1016/j.jksues.2021.06.007.
11. **Manzhai V.N., Fufaeva M.S., Kashlach E.S.** Relaxation of Mechanical Stress in Poly(vinyl alcohol) Cryogels of Different Compositions. *Chin. J. Polym. Sci.* 2023. V. 41. P. 442–447. DOI: 10.1007/s10118-022-2889-8.
12. **Michurov D.A., Makhina T.K., Siracusa V., Bonartsev A.P., Lozinsky V.I., Iordanskii A.L.** Poly(vinyl alcohol)-based cryogels loaded with the poly(3-hydroxybutyrate) microbeads and the evaluation of such composites as the delivery vehicles for simvastatin. *Polymers*. 2022. V. 14. N 11. 2196. DOI: 10.3390/polym14112196.
13. **Peppas N.A., Stauffer S.R.** Reinforced uncrosslinked poly (vinyl alcohol) gels produced by cyclic freezing-thawing processes A short review. *J. Control. Release*. 1991. V. 16. P. 305–310. DOI: 10.1016/0168-3659(91)90007-Z.
14. **Hassan C.M., Peppas N.A.** Structure and applications of poly(vinyl alcohol) hydrogels produced by conventional

REFERENCES

1. **Romero-Zeron L.** Chemical Enhanced Oil Recovery (cEOR) – a Practical Overview. London: InTechOpen Ltd. 2016. 200 p. DOI: 10.5772/61394.
2. **Muslimov R.Kh.** Oil recovery: Past, Present, Future. Kazan': «FEN». 2012. 664 p. (in Russian).
3. **Altunina L.K., Kuvshinov V.A., Stasyeva L.A., Kuvshinov I.V.** Trends and prospects of physicochemical methods for enhanced oil recovery of heavy oil fields. *Chem. Sustain. Dev.* 2018. V. 26. N 3. P. 240–255. DOI: 10.15372/KhUR20180303.
4. **Kuvshinov I.V., Kuvshinov V.A., Altunina L.K.** Field experience of thermotropic compositions application for enhanced oil recovery. *Neftyanoe Khozyastvo*. 2017. N 1. P. 44–47 (in Russian).
5. **Alvarado V., Manrique E.** Enhanced oil recovery: An update review. *Energies*. 2010. V. 3. N 9. P. 1529–1575. DOI: 10.3390/en3091529.
6. **Al-Muntasheri G. A., Hussein I. A., Nasr-El-Din H. A., Mohamed Amin B.** Viscoelastic properties of a high temperature cross-linked water shut-off polymeric gel. *J. Pet. Sci. Eng.* 2007. V. 55. N 1–2. P. 56–66. DOI: 10.1016/j.petrol.2006.04.004.
7. **Battistel E., Bianchi D., Fornaroli M., Cobianco S.** Enzymes breakers for viscosity enhancing polymers. *J. Pet. Sci. Eng.* 2011. V. 77. N 1. P. 10–17. DOI: 10.1016/j.petrol.2011.02.003.
8. **Fink J.** Chap. 16. Gel breakers, Hydraulic Fracturing Chemicals and Fluids Technology. 2020. P. 205–222. DOI: 10.1016/B978-0-12-822071-9.00023-2.
9. **Sun X., Gao Z., Zhao M., Gao M., Mingyong D.U., Dai C.** Development and evaluation of a novel seawater-based viscoelastic fracturing fluid system. *J. Pet. Sci. Eng.* 2019. V. 183. N 4. P. 106408. DOI: 10.1016/j.petrol.2019.106408.
10. **Martyushev D.A., Govindarajan S.K.** Development and study of a Visco-Elastic Gel with controlled destruction times for killing oil wells. *J. King Saud Univ. Eng. Sci.* 2022. V. 34. N 7. P. 408–415. DOI: 10.1016/j.jksues.2021.06.007.
11. **Manzhai V.N., Fufaeva M.S., Kashlach E.S.** Relaxation of Mechanical Stress in Poly(vinyl alcohol) Cryogels of Different Compositions. *Chin. J. Polym. Sci.* 2023. V. 41. P. 442–447. DOI: 10.1007/s10118-022-2889-8.
12. **Michurov D.A., Makhina T.K., Siracusa V., Bonartsev A.P., Lozinsky V.I., Iordanskii A.L.** Poly(vinyl alcohol)-based cryogels loaded with the poly(3-hydroxybutyrate) microbeads and the evaluation of such composites as the delivery vehicles for simvastatin. *Polymers*. 2022. V. 14. N 11. 2196. DOI: 10.3390/polym14112196.
13. **Peppas N.A., Stauffer S.R.** Reinforced uncrosslinked poly (vinyl alcohol) gels produced by cyclic freezing-thawing processes A short review. *J. Control. Release*. 1991. V. 16. P. 305–310. DOI: 10.1016/0168-3659(91)90007-Z.
14. **Hassan C.M., Peppas N.A.** Structure and applications of poly(vinyl alcohol) hydrogels produced by conventional

- crosslinking or by freezing/thawing methods. *Adv. Polym. Sci.* 2000. 153. P. 37–65. DOI: 10.1007/3-540-46414-X_2.
15. **Prosanov I.Yu., Abdulrahman S.T., Thomas S., Bulina N.V., Gerasimov K.B.** Complex of polyvinyl alcohol with boric acid: structure and use. *Mater. Today Commun.* 2018. V. 14. P. 77–81. DOI: 10.1016/j.mtcomm.2017.12.012.
 16. **Малкин А.Я.** Основы реологии. СПб.: ЦОП «Профессия». 2018. 336 с.
 17. **Шрамм Г.** Основы практической реологии и реометрии. М.: Колосс. 2003. 311 с.
 18. **Колешко В.М., Сунка В.Я., Полянская Е.В., Крупская Е.В.** Проектирование интеллектуальных сенсорных систем измерения вязкости. Минск: изд-во БНТУ. 2010. 81 с.
 19. **Соловьев А.Н., Каплун А.Б.** Вибрационный метод измерения вязкости жидкостей. Новосибирск: Наука. 1970. 142 с.
 20. Вибровискозиметр серии SV. Руководство по эксплуатации. Электронный ресурс: <https://www.mirvesov.ru/docs/guide/10138.pdf>.
 21. **Богословский А.В., Кожевников И.С.** Архитектура камертонных датчиков вязкости. *Башир. Хим. Журн.* 2023. Т. 30. № 1. С. 129–133. DOI: 10.17122/bcj-2023-1-129-133.
 22. **Алтунина Л.К., Кувшинов В.А., Кувшинов И.В., Чертенков М.В.** «Холодные» технологии повышения нефтеотдачи. *Oil Gas J.* 2016. № 1–2. С. 80–84.
 23. **Фуфаева М.С., Алтунина Л.К.** Криогели для увеличения срока эксплуатации зимника. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2024. Т. 67. Вып. 8. С. 29–35. DOI: 10.6060/ivkkt.20246708.13t.
 24. **Овсянникова В.С., Фуфаева М.С., Ким Е., Алтунина Л.К.** Биоразложение в почве материалов на основе криогелей поливинилового спирта и крахмала. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2023. Т. 66. Вып. 11. С. 126–134. DOI: 10.6060/ivkkt.20236611.6t.
 15. **Prosanov I.Yu., Abdulrahman S.T., Thomas S., Bulina N.V., Gerasimov K.B.** Complex of polyvinyl alcohol with boric acid: structure and use. *Mater. Today Commun.* 2018. V. 14. P. 77–81. DOI: 10.1016/j.mtcomm.2017.12.012.
 16. **Malkin A.Ya.** Fundamentals of rheology. SPb.: TsOP "Professiya". 2018. 336 p. (in Russian).
 17. **Shramm G.** Fundamentals of Practical Rheology and Rheometry. M.: Koloss. 2003. 311 p. (in Russian).
 18. **Koleshko V.M., Sunka V.Ya., Polynkova E.V., Krupskaya E.V.** Designing intelligent sensor systems for viscosity measurement. Minsk: BNTU. 2010. 81 p. (in Russian).
 19. **Solov'ev A.N., Kaplun A.B.** Vibration method for measuring the viscosity of liquids. Novosibirsk: Nauka. 1970. 142 p. (in Russian).
 20. Vibroviscometer of the SV series. Manual. Electronic resource: <https://www.mirvesov.ru/docs/guide/10138.pdf>.
 21. **Bogoslovskii A.V., Kozhevnikov I.S.** Architecture of tuning-fork viscosity sensors. *Bashkir. Khim. Zhurn.* 2023. V. 30. N 1. P. 129–133 (in Russian). DOI: 10.17122/bcj-2023-1-129-133.
 22. **Altunina L.K., Kuvshinov V.A., Stasyeva L.A., Kuvshinov I.V., Chertenkov M.V.** "Cold" technologies for enhanced oil recovery. *Oil Gas Journal.* 2016. N 1–2. P. 80–84.
 23. **Fufaeva M.S., Altunina L.K.** Cryogels to increase the service life of winter roads. *ChemChemTech. [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2024. V. 67. N 8. P. 29–35 (in Russian). DOI: 10.6060/ivkkt.20246708.13t.
 24. **Ovsyannikova V.S., Fufaeva M.S., Kim Y., Altunina L.K.** Biodegradation in soil of polymeric materials based on polyvinyl alcohol and starch cryogels. *ChemChemTech. [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2023. V. 66. N 11. P. 126–134 (in Russian). DOI: 10.6060/ivkkt.20236611.6t.

Поступила в редакцию 02.12.2024

Принята к опубликованию 24.03.2025

Received 02.12.2024

Accepted 24.03.2025